

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПЕРЕКЛЮЧАЮЩИЕ ПРИБОРЫ

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 629

В. В. ТАЩИЯН

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПЕРЕКЛЮЧАЮЩИЕ ПРИБОРЫ



«ЭНЕРГИЯ»
МОСКВА 1967

УДК 621.382.014.2

Тащиян В. В.

Т12 Полупроводниковые переключающие приборы. М., «Энергия», 1967.

72 с. с илл. (Массовая радиобиблиотека. вып. 629) 30 000 экз., 20 к.

Рассматриваются основные свойства и параметры некоторых полупроводниковых переключающих приборов: туннельных диодов, полевых приборов, динисторов, тиристоров и запираемых переключателей. Приводятся примеры построения и применения различных переключающих схем. Предназначена для подготовленных радиолюбителей.

3-4-5
337-67

6ФД.13

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ

Бурное развитие электроники привело к созданию большого числа новых полупроводниковых переключающих приборов. К таким приборам относятся туннельные диоды, полевые приборы, динисторы, тиристоры и запираемые переключатели. Их появление позволило значительно упростить управление переключающими схемами, повысить мощность и существенно увеличить к. п. д. и надежность переключающих устройств.

В данной книге приведен краткий обзор наиболее перспективных полупроводниковых переключающих приборов, рассматриваются их свойства и области применения. Рассмотренные примеры являются наиболее характерными для каждого класса приборов; они, естественно, не исчерпывают всех возможных их применений.

Для отечественных серийных переключающих приборов в книге даны сводные таблицы с указанием параметров.

В. Тащиян

Глава первая

ТУННЕЛЬНЫЕ ДИОДЫ

Принцип действия

Среди открытых за последние годы новых полупроводниковых приборов туннельный диод является одним из наиболее перспективных для использования в различных радиотехнических схемах. Это прежде всего объясняется высокой скоростью переключения прибора, простотой его конструкции, надежностью и малым потреблением мощности.

Принцип работы туннельного диода основан на использовании туннельного эффекта, сущность которого заключается в следующем. Согласно законам классической физики электрон может преодолеть потенциальный барьер запирающего слоя *p-n* перехода только в том случае, когда его энергия окажется выше. Однако, если толщина *p-n* перехода очень мала, существует некоторая отличная от нуля вероятность того, что электроны, обладающие энергией меньшей, чем высота потенциального барьера *p-n* перехода, могут все же проникнуть «сквозь» потенциальный барьер, как бы используя своеобразные туннели. Такое проникновение электрона сквозь энергетический барьер называется туннельным эффектом.

Как уже было отмечено, туннельный эффект возможен только в случае очень малой толщины *p-n* перехода, которая, как известно, зависит от степени легирования полупроводниковых материалов (концентрации примесей). Чем больше степень легирования, тем меньше получается толщина *p-n* перехода. Для изготовления туннельных диодов применяются материалы с очень высокой концентрацией примесей, которая в сотни и тысячи раз превышает концентрацию материалов, используемых для образования *p-n* переходов обычных диодов. В результате этого *p-n* переход туннельных диодов имеет очень малую толщину: ~ 100 Å (у обычных диодов эта величина достигает $\sim 10\,000$ Å). На таком тонком *p-n* переходе уже при небольших напряжениях возникает значительная напряженность электрического поля, равная примерно 10^5 *в/см*. Большая напряженность электрического поля и малая толщина *p-n* перехода являются необходимым условием возникновения туннельного эффекта.

Качественное представление о работе туннельного диода можно получить из рассмотрения его энергетической диаграммы, приведенной на рис. 1. При нулевом смещении уровни Ферми в *p* и *n* областях совпадают (рис. 1,*а*). Поэтому через переход осуществляется

2—2730

свободное туннельное прохождение электронов из зоны проводимости области n в валентную зону области p и наоборот. При нулевом смещении обе составляющие тока равны и направлены в противоположные стороны. Следовательно, суммарный ток через диод равен нулю.

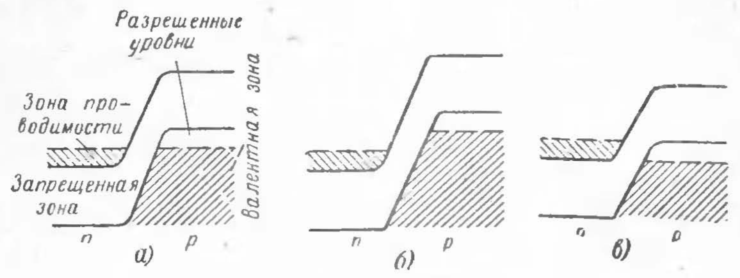


Рис. 1. Энергетическая диаграмма туннельного диода.

Если приложить обратное (запирающее) смещение (рис. 1,*б*), то уровень Ферми в области p станет выше уровня Ферми в области n и количество электронов, переходящих из области p в n, увеличится, а количество электронов, переходящих из области n в p, останется неизменным. Таким образом, приложение запирающего смещения приведет к возрастанию обратного тока, который начинает быстро увеличиваться уже при малой величине прикладываемого напряжения.

Если же к *p-n* переходу приложить небольшое по величине прямое смещение, то уровень Ферми в области p понизится относительно уровня Ферми в области n. В результате электроны зоны проводимости области n окажутся против свободных уровней в валентной зоне области p, а электроны валентной зоны области p — против запрещенной зоны области n. Это приведет к тому, что количество электронов, проникающих в область p, будет увеличиваться (рис. 1,*в*), а количество электронов, проходящих в обратном направлении, уменьшится до нуля. Следовательно, ток будет протекать только в прямом направлении.

Рис. 2. Вольт-амперная характеристика туннельного диода.

При увеличении прямого смещения часть электронов зоны проводимости области n окажется против запрещенной зоны области p и поток электронов из зоны проводимости в валентную зону уменьшится. Таким образом, при увеличении прямого смещения прямой ток начинает падать. Убывание тока через *p-n* переход будет происходить до тех пор, пока потолок валентной зоны области p не

совпадет с дном зоны проводимости области n. При этом прямой ток достигнет своего минимального значения. Дальнейшее увеличение прямого смещения вновь приведет к увеличению тока, но уже за счет преодоления электронами потенциального барьера запирающего слоя.

Вольт-амперная характеристика туннельного диода приведена на рис. 2. Эту характеристику условно можно разбить на три участка.

Участок *1—2* соответствует небольшому прямому смещению, когда количество электронов, проходящих за счет туннельного эффекта при увеличении прямого смещения, увеличивается.

Участок *2—3* представляет собой участок характеристики с отрицательным сопротивлением, на котором прямой ток уменьшается с увеличением прямого смещения за счет того, что часть электронов зоны проводимости области n оказывается против запрещенной зоны области p.

Участок *3—4* такой же, как и прямая ветвь вольт-амперной характеристики обычного диода.

Основные характеристики и параметры

Основными статическими характеристиками туннельного диода являются (рис. 2):

а) ток в максимуме вольт-амперной характеристики $I_{макс}$, представляющий собой максимальное значение тока, обусловленного туннельным эффектом;

б) ток в минимуме $I_{мин}$;

в) отношение максимального тока к минимальному $I_{макс}/I_{мин}$;

г) напряжение $U_{макс}$, соответствующее току $I_{макс}$;

д) напряжение $U_{мин}$, соответствующее току $I_{мин}$;

е) прямое напряжение $U_{п}$, соответствующее второй точке вольт-амперной характеристики, в которой ток равен $I_{макс}$.

Параметры, характеризующие динамику работы туннельного диода, приведены на рис. 3, где показана его эквивалентная схема. Здесь: G—отрицательная проводимость диода, определяемая в рабочей точке по наклону вольт-амперной характеристики; C — емкость *p-n* перехода туннельного диода; R — последовательное сопротивление диода, включающее потери в толще кристалла, в контактах и выводах; $L_{д}$—индуктивность корпуса прибора (в частности, индуктивность проводника, соединяющего верхний электрод с корпусом) и соединительных проводников.

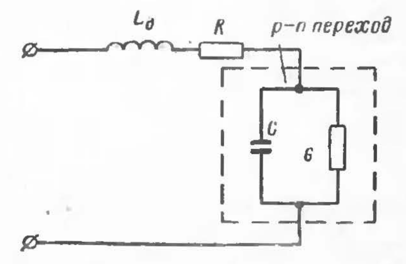


Рис. 3. Схема замещения туннельного диода.

Для изготовления туннельных диодов применяются различные полупроводниковые материалы: германий, кремний, арсенид галлия, фосфид индия, арсенид индия, антимонид индия и антимонид галлия. Выбор материала в значительной степени определяется требуемыми параметрами прибора. Большинство выпускаемых промышленностью

Таблица 1

Германиевые туннельные диоды

Параметры	Тип диода			
	1И302А	1И302Б	1И302В	1И302Г
$I_{макс}$, *ма*, при $+20°$ С	1,7—2,3	4,3—5,8	8,5—11,5	13—17
$I_{макс}/I_{мин}$ (не менее):				
при $+20$ и $-60°$ С	4,5	4,5	4,5	4,5
при $+70°$ С	3,5	3,5	3,5	3,5
$U_{макс}$ (не более), *мв*	60	60	60	60
Емкость диода C при $+20°$ С (не более), *пф*	80	150	180	200

Таблица 2

Туннельные диоды из арсенида галлия

Параметры	Тип диода			
	3И301А	30301Б	3И301В	3И301Г
$I_{макс}$, *ма*:				
при $+25°$ С	2	5	5	10
при $+70°$ С	1,5—2,4	4,2—5,5	4,2—5,5	8,4—11
при $-60°$ С	1,4—2,7	3,9—6,2	3,9—6,2	8—12
Допустимое отклонение $I_{макс}$, %	±20	±10	±10	±10
$I_{макс}/I_{мин}$, не более	8	8	8	8
$U_{макс}$ (не более), *в*	0,18	0,18	0,18	0,18
Емкость диода C (не более), *пф*	12	25	25	50

туннельных диодов изготовляется из германия или арсенида галлия. Основные параметры выпускаемых отечественной промышленностью туннельных диодов приведены в табл. 1 и 2.

Некоторые области применения

Туннельные диоды привлекли к себе внимание широкого круга специалистов благодаря многообразию функций, которые они могут выполнять (генерирование электрических колебаний, быстрое переключение, преобразование частоты, усиление и т. д.). Значительный интерес представляет использование туннельных диодов в диапазоне СВЧ в качестве генераторов и усилителей. Туннельные диоды работают на основных носителях и не имеют ограничений, связанных со временем дрейфа носителей заряда. Поэтому предельная частота, на которой могут работать современные туннельные диоды, достигает 100 *Ггц* и ограничивается лишь паразитными параметрами C и $L_д$. Время переключения туннельного диода составляет 1—2 *нсек* и менее. Туннельные диоды имеют высокую температурную стабильность параметров и низкий уровень шумов.

К числу недостатков туннельных диодов следует отнести большую чувствительность к колебаниям напряжения питания при работе их в схемах переключателей, а также низкую выходную мощность.

Генераторы. Туннельные диоды являются перспективными приборами с точки зрения применения их в генераторах колебаний, обладающих высоким частотным пределом, малой мощностью потребления, высокой стабильностью и простотой схемы. Однако такие генераторы имеют низкую выходную мощность вследствие малого колебательного напряжения, размах которого ограничен разностью максимального и минимального напряжений (см. рис. 2).

Наличие на вольт-амперной характеристике участка с отрицательной проводимостью допускает применение туннельного диода в схемах генераторов с самовозбуждением. Простейший генератор синусоидальных колебаний приведен на рис. 4. Он состоит из цепи смещения (источник $E_{см}$ и резистор $R_{см}$), туннельного диода и колебательного контура, образованного индуктивностью L ($L = L_н + L_д$, где $L_н$ — индуктивность нагрузки, а $L_д$ — индуктивность диода) и емкостью *p-n* перехода туннельного диода.

Рис. 4. Генератор синусоидальных колебаний.

Для нормальной работы генератора с самовозбуждением к туннельному диоду должно быть приложено напряжение смещения от источника постоянного напряжения, выводящее рабочую точку на участок вольт-амперной характеристики с отрицательной проводимостью. Кроме того, необходимо добиться, чтобы рабочая точка по переменному току была не стабильна. Для этого достаточно выполнить условие $L \geqslant \frac{R_{см}C}{G}$, где $R_{см}$ — результирующее сопротивление цепи смещения, G и C — проводимость и емкость туннельного диода.

В случае, если $L = \frac{R_{см}C}{G}$, колебания генератора близки к синусоидальным, но их амплитуда мала. При увеличении индуктивности амплитуда автоколебаний возрастает и максимальный размах становится равным $U_{мин} - U_{макс}$. Однако при этом существенно увеличивается количество гармоник, содержащихся в автоколебаниях.

Расчет генератора обычно начинается с выбора диода, способного развивать требуемую выходную мощность на заданной частоте. Максимальная выходная мощность, которую может развивать генератор с самовозбуждением на одном туннельном диоде, выражается следующим соотношением:

$$P_{макс} = \frac{1}{8}(U_{мин} - U_{макс})(I_{макс} - I_{мин}).$$

При этом предполагается, что рабочая точка совершает колебания от напряжения $U_{макс}$ до $U_{мин}$ (рис. 2). Естественно, что

вследствие нелинейности характеристики вблизи этих точек форма колебаний будет значительно искажена.

Существует несколько возможных схем генераторов с самовозбуждением, каждая из которых имеет свои преимущества и недостатки. Схемы эти таковы: генератор с последовательным контуром (рис. 5,*а*), генератор с параллельным контуром (рис. 5,*б*) и генератор с последовательно-параллельным контуром (рис. 5,*в*).

Рабочая частота указанных генераторов зависит от емкостей конденсаторов, подключаемых параллельно туннельному диоду и индуктивности катушек. Поэтому очевидно, что последовательная схема обеспечивает максимальную рабочую частоту, поскольку ем-

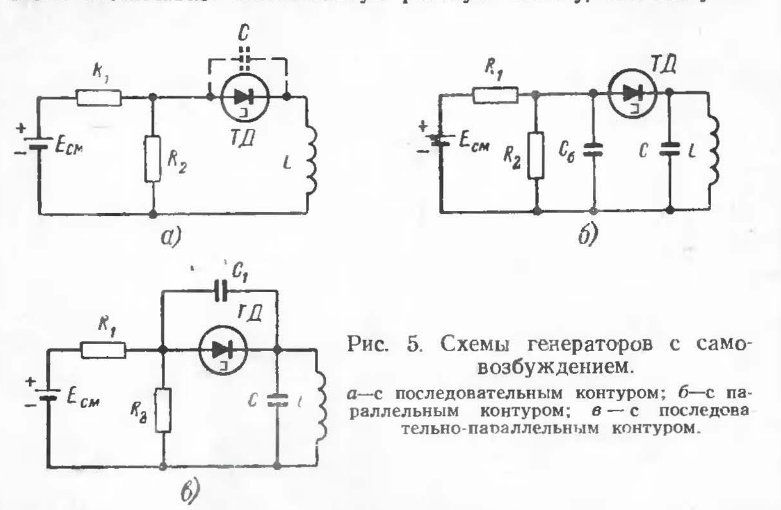


Рис. 5. Схемы генераторов с самовозбуждением.

а—с последовательным контуром; *б*—с параллельным контуром; *в* — с последовательно-параллельным контуром.

кость C в этой схеме наименьшая (C — емкость *p-n* перехода туннельного диода). Амплитуда и форма колебаний могут меняться в широких пределах за счет изменения отношения, L/C и величины напряжения смещения. Для получения подходящего отношения L/C на низких частотах необходимо параллельно емкости C подключать емкость C_1.

Следует отметить, что генератор с последовательным контуром обладает невысокой стабильностью частоты. Поэтому в случаях, когда требуется повышенная стабильность частоты, применяются генераторы, построенные по последовательно-параллельной схеме.

Наибольшая амплитуда выходного сигнала достигается в генераторе с параллельным контуром. Это объясняется тем, что конденсатор шунтирует по переменной составляющей сопротивление смещения, а активное сопротивление на частоте генерации практически равно сопротивлению потерь туннельного диода (десятые доли — единицы ома). В результате увеличивается размах колебаний рабочей точки, а следовательно, и амплитуда выходного напряжения. Однако при этом резко повышается содержание в колебаниях гармоник. Таким образом, «последовательный» генератор наибоее прост и имеет максимальную рабочую частоту, «параллельный генератор» — наибольшую выходную мощность, а «параллельно-последовательный» наибольшую стабильность формы колебаний.

Усилители. Туннельные диоды находят широкое применение в схемах малошумящих входных усилителей СВЧ приемников. Хотя в этом диапазоне частот параметрические усилители и мазеры имеют несколько лучшие значения коэффициента шума, тем не менее туннельные диоды более предпочтительны там, где важны малый вес и небольшие габариты усилителя, а также малое потребление энергии. Усилители СВЧ на туннельных диодах могут быть с успехом использованы в различных системах связи, радиолокации, в системах радиопротиводействия, а также в космических летательных аппаратах (космические спутники связи).

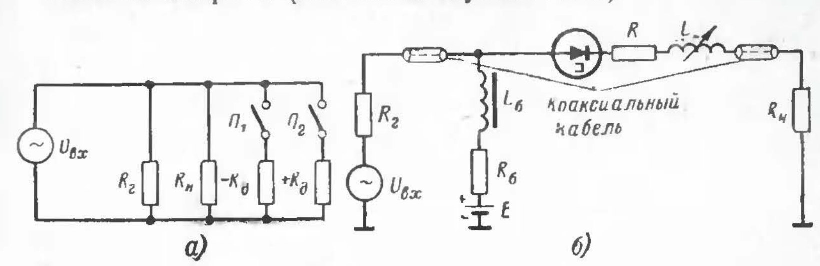


Рис. 6. Усилители.

Принцип работы усилителя с применением туннельного диода рассмотрим на примере схемы, приведенной на рис. 6,*а*. Предположим, что генератор синусоидального напряжения $U_{вх}$ с внутренним сопротивлением $R_г$ нагружен на сопротивление $R_н$ (сопротивления $-R_д$ и $+R_д$ отключены с помощью переключателей $П_1$ и $П_2$). Кроме того, будем считать, что сопротивление $R_н$ и $R_г$ равны, т. е. на нагрузке выделяется максимальная мощность.

Подключим параллельно генератору напряжения и нагрузке положительное сопротивление $+R_д$. Тогда часть от тока генератора будет ответвляться в это сопротивление и мощность, выделяемая на нагрузке, уменьшится. Если же теперь вместо положительного сопротивления $+R_д$ подключить отрицательное сопротивление $-R_д$, то ток, ответвляющийся в эту добавочную ветвь, будет противоположен по фазе току, который проходил через положительное сопротивление $+R_д$. Следовательно, ток не поступает в отрицательное сопротивление, а отдается им. Таким образом, эта ветвь работает как генератор и обеспечивает подачу дополнительного тока в нагрузку.

Поскольку «усилительный» элемент — отрицательное сопротивление — является двухполюсником, обычные для ламповых и транзисторных схем понятия «вход» и «выход», «входная» и «выходная» мощности в данном случае неприменимы. Для количественной характеристики обычно используется понятие коэффициента вносимого усиления по мощности $K_{вн}$. Этот коэффициент, равный отношению мощностей в нагрузке при включенном и выключенном отрицательном сопротивлении, показывает, какую мощность вносит в нагрузку активный двухполюсник по сравнению с пассивной цепью, состоящей из сопротивлений $R_г$ и $R_н$. Коэффициент вносимого усиления зависит от соотношения сопротивлений $(R_г+R_н)$ и $-R_д$ и может принимать различные значения. Так, при $(R_н+R_г)=|-R_д|$ этот коэффициент стремится к бесконечности и усилитель

работает неустойчиво. Для нормальной работы усилителя необходимо, чтобы сумма $R_н+R_г$ всегда была меньше абсолютного значения $-R_д$.

Приведенная на рис. 6,*а* схема является эквивалентом «параллельного» усилителя на туннельном диоде для диапазона низких частот, в котором паразитными реактивными сопротивлениями диода можно пренебречь.

Для диапазона средних и высоких частот паразитные реактивные сопротивления диода необходимо учитывать, так как емкость туннельного диода включена параллельно отрицательному сопротивлению и по мере увеличения частоты увеличивается ее шунтирующее действие. Поэтому в «параллельном» усилителе параллельно туннельному диоду включается катушка, индуктивность которой подбирается таким образом, чтобы на рабочей частоте колебательный контур, образованный дополнительной индуктивностью и емкостью туннельного диода, был настроен в резонанс.

Как уже отмечалось, усилители на туннельных диодах применяются в СВЧ диапазоне. Это объясняется тем, что на более низких частотах очень сложно получить устойчивое усиление на туннельных диодах, в то время как обычные транзисторы позволяют это сделать сравнительно легко. Кроме того, трудность построения усилителей заключается в том, что туннельный диод имеет общие клеммы «вход» и «выход» и одинаково усиливает в обоих направлениях. Это обстоятельство усложняет построение многокаскадных усилителей, особенно в диапазоне звуковых и радиочастот. В диапазоне СВЧ для межкаскадной развязки используются ферритовые ответвители и циркуляторы. В радиочастотном диапазоне эффективных способов развязки пока не найдено.

Большинство практически реализованных усилителей на туннельных диодах — последовательные. Один из возможных вариантов такого усилителя приведен на рис. 6,*б*. Подстроечным элементом усилителя служит небольшая катушка индуктивности *L*. Батарея *E* совместно с резисторами $R_б$, $R_г$, *R* и $R_н$ определяет положение рабочей точки усилителя по постоянному току. Индуктивность $L_б$ блокирует источник питания *E* по переменной составляющей. Современные усилители на туннельных диодах работают до частот порядка десятков гигагерц ($\lambda=1$ *см*) с коэффициентом усиления $K_{вн}=10^2\div10^4$ при коэффициенте шума до 2 *дб*.

Переключающие и логические схемы. Высокое быстродействие туннельных диодов и малое потребление энергии делает их наиболее пригодными для применения в качестве переключающих элементов. В настоящее время туннельные диоды широко используются в импульсных генераторах с чрезвычайно малым временем нарастания импульса, а также в сверхбыстродействующих схемах счетно-решающих устройств и цифровых вычислительных машин. Применение в них туннельных диодов вместо транзисторов позволяет повышать быстродействие примерно на два порядка. Кроме того, схемы на туннельных диодах потребляют значительно меньше энергии от источника питания по сравнению с маломощными схемами на транзисторах.

Работа переключающих схем на туннельных диодах основана на том, что путем изменения величины нагрузочного сопротивления $R_н$ или напряжения источника смещения осуществляется переброс туннельного диода из одного устойчивого состояния равновесия в другое. При соответствующем подборе напряжения смещения и

сопротивления нагрузки туннельные диоды можно использовать в различных режимах работы.

На рис. 7 представлены нагрузочные прямые, характеризующие три различных случая применения туннельных диодов. Нагрузочная прямая *1* пересекает вольт-амперную характеристику туннельного диода в точке *A*. Эта точка расположена на участке отрицательного сопротивления и является рабочей для нестабильных переключающих схем (релаксационных генераторов). Для возбуждения необходимо принять меры, чтобы в данной рабочей точке состояние равновесия было неустойчивым, т. е. выполнить условие самовозбуждения.

При конструировании переключающих схем с одним устойчивым состоянием нагрузочная линия должна пересекать вольт-амперную характеристику туннельного диода в одной из точек устойчивой области *OK*, например в точке *B* (прямая *2*).

В схемах с двумя устойчивыми состояниями нагрузочная прямая *3* пересекает вольт-амперную характеристику в трех точках *C*, *D*, *E*, из которых две — *C* и *E* — абсолютно устойчивы.

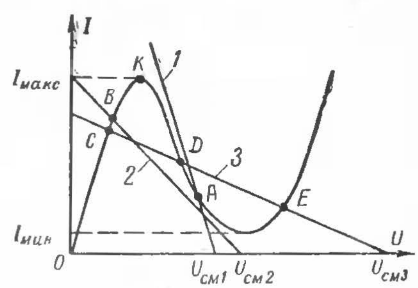


Рис. 7. Нагрузочные прямые для различных случаев применения туннельных диодов.

Релаксационный генератор. Один из возможных релаксационных генераторов приведен на рис. 8,*а*. Напряжение смещения $U_{см}$ и сопротивление резистора $R_{см}$ выбираются таким образом, чтобы нагрузочная характеристика генератора пересекала вольт-амперную характеристику туннельного диода в точке *A* (рис. 7). Рабочая частота генератора зависит от индуктивности *L*. Схема работает следующим образом. При подключении цепи к источнику постоянного напряжения ток через индуктивность *L* начинает увеличиваться по экспоненте до тех пор, пока не достигнет величины $I_{макс}$. После этого диод переключается в состояние с большим падением напряжения. Увеличение падения напряжения на туннельном диоде приведет к снижению тока в цепи. Уменьшение тока будет также происходить по экспоненциальному закону. По достижении током значения $I_{мин}$ диод переключится в состояние с меньшим падением напряжения и весь цикл повторится. Форма выходного напряжения такого релаксационного генератора приведена на рис. 8,*б*.

Ждущий мультивибратор. Типичная схема подобного мультивибратора показана на рис. 8,*в*. Эта схема применяется в различных устройствах дискретной техники для формирования импульсов стандартной формы с заданной амплитудой и длительностью из входных произвольных импульсов положительной или отрицательной полярности. Здесь активное сопротивление нагрузки и напряжение источника смещения выбираются таким образом, чтобы рабочая точка находилась на участке вольт-амперной характеристики туннельного диода с положительным сопротивлением (точка *A* на рис. 8,*г*). При появлении запускающего положительного импульса рабочая точка туннельного диода достигает значения тока, равного

$I_{макс}$, и затем скачком перемещается в точку C. После скачка рабочая точка медленно перемещается в точку B (плоская вершина импульса), после чего туннельный диод быстро перебрасывается в исходное состояние. В этот момент формируется задний фронт генерируемого импульса.

Для формирования импульсов отрицательной полярности в схеме должно быть изменено напряжение источника питания, как это показано на рис. 8,*д*. Схема работает аналогично предыдущей с той лишь разницей, что запускающий импульс должен быть отрицатель-

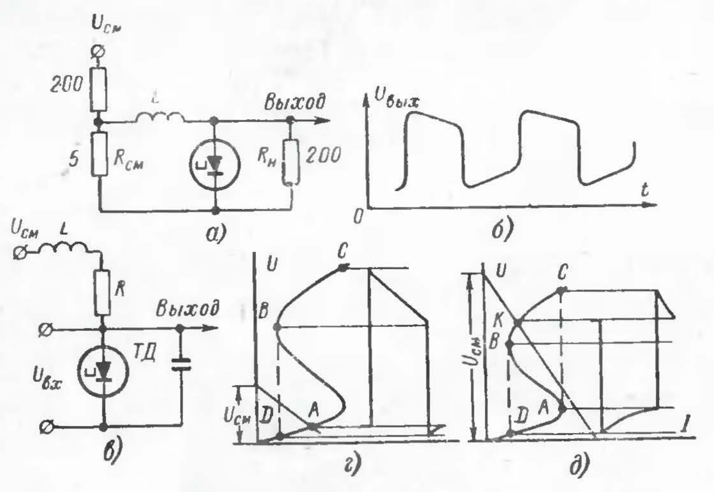


Рис. 8. Ждущий мультивибратор.

ной полярности. Длительность сформированного мультивибратором импульса определяется индуктивностью L, емкостью *p-n* перехода туннельного диода, а также частично и реактивными параметрами задающего генератора и нагрузки.

Переключающие схемы с двумя устойчивыми состояниями. Наличие на вольт-амперной характеристике туннельного диода участка с отрицательным сопротивлением позволяет создавать переключающие схемы на туннельных диодах с двумя устойчивыми состояниями. В этом случае нагрузочная линия должна пересекать вольт-амперную характеристику туннельного диода в двух точках (A и D), как это показано жирной линией на рис. 9,*а*. Переключающая схема на туннельном диоде с двумя устойчивыми состояниями приведена на рис. 9,*б*. При подаче положительного запускающего импульса ток через туннельный диод возрастает и рабочая точка скачком перемещается в точку B, а затем медленно переходит в точку D. Теперь, для того чтобы вернуть рабочую точку на исходный участок вольт-амперной характеристики, к туннельному диоду должен быть приложен отрицательный импульс такой амплитуды, чтобы ток через туннельный диод снизился до значения тока $I_{мин}$. После этого рабочая точка скачком переместится из точки D в E. После окончания запускающего импульса схема вернется в исходное состояние

Логические схемы. В настоящее время туннельные диоды успешно применяются в схемах пороговой логики. Переключение туннельного диода из одного устойчивого состояния в другое происходит тогда, когда достигается «пороговая точка», т. е. точка максимума или минимума на вольт-амперной характеристике прибора. Существует два типа логических схем: одностабильные и двустабильные. При построении одностабильных логических схем не требуется, чтобы туннельный диод удерживался во включенном положении. После исчезновения входного сигнала он может вер-

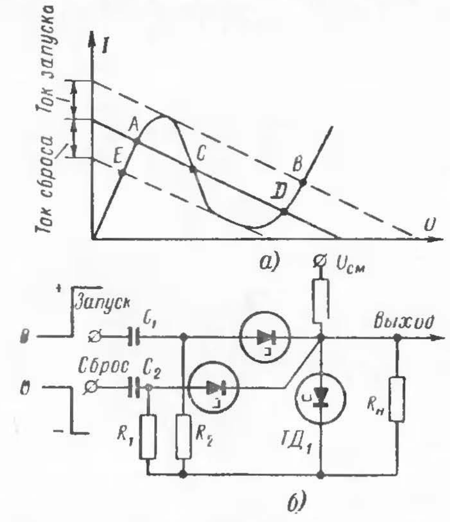


Рис. 9. Схема переключения с двумя устойчивыми состояниями.

нуться в исходное состояние. Поэтому логические схемы *И*, *ИЛИ*, *НЕ* на туннельных диодах могут быть выполнены без дополнительного источника смещения. В случае же если в исходном состоянии рабочую точку необходимо несколько сдвинуть от начала координат, используется небольшое дополнительное смещающее напряжение.

В логической схеме *ИЛИ* сигнал на выходе появляется в том случае, когда хотя бы на один из входов схемы подан управляющий сигнал. Поэтому исходное положение рабочей точки должно быть таким, чтобы при приложении к любому из входов схемы управляющего сигнала $I_{вх}$ ток через туннельный диод превышал величину $I_{макс}$ и туннельный диод переключался. Это достигается соответствующим выбором амплитуды управляющего сигнала и величиной напряжения смещения. Схема *ИЛИ* приведена на рис. 10,*а*, а на рис. 10,*б* дана ее рабочая характеристика.

В схеме *И* выходной сигнал появляется только в том случае, когда на всех входах имеются управляющие сигналы. Поэтому при подаче управляющего сигнала на один из входов рабочая точка перемещается в точку A (рис. 10,*в*) вольт-амперной характеристики туннельного диода. При наличии управляющих сигналов на двух

входах рабочая точка сместится в точку *B*, а при подаче управляющего сигнала и на третий вход произойдет переключение туннельного диода.

Конструктивно схема *И* такая же, как *ИЛИ*, и отличается от нее только параметрами входных сигналов. В качестве входов схем *И* и *ИЛИ* обычно используются специальные точечные диоды, обладающие низким прямым падением напряжения.

Помимо одностабильных логических схем существуют также двухстабильные логические схемы, имеющие два устойчивых состояния (равновесия). Рабочие характеристики такой схемы приведены на рис. 10,*г*. Если напряжение смещения и сопротивления нагрузки

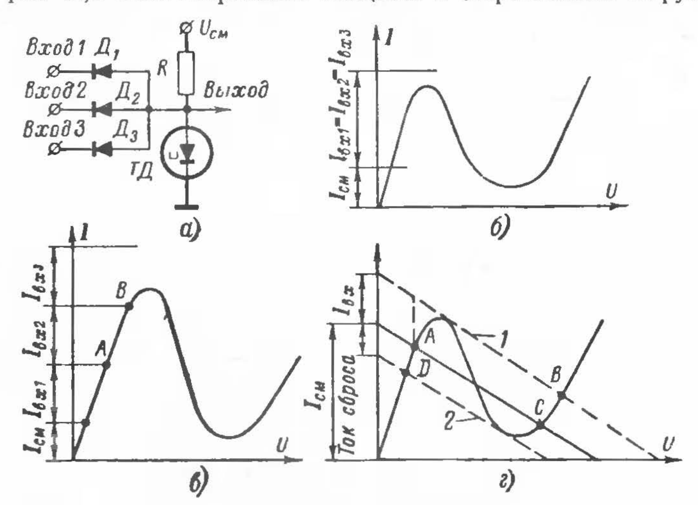


Рис. 10. Логическая схема и ее рабочие характеристики.

выбраны таким образом, что рабочая точка находится в положении *A*, то любой из входных импульсов тока, амплитуда которого больше $I_{вх}$, переключит диод в положение *B*. По мере затухания входного импульса рабочая точка перемещается в положение *C*, где состояние равновесия устойчивое. Возврат в исходное положение *A* осуществляется с помощью импульса сброса (на рис. 10,*г* нижняя пунктирная нагрузочная линия).

Двухстабильная ячейка *И* строится аналогично схеме *ИЛИ*, за исключением лишь того, что все входные импульсы должны подаваться до того, как туннельный диод переключится в область наименьшего напряжения.

Комбинированные схемы. Как уже было указано ранее, туннельный диод, обладая хорошими частотными характеристиками, имеет ряд существенных недостатков, среди которых, основными являются отсутствие развязки между входом и выходом и низкое выходное напряжение. Все это затрудняет использование туннельных диодов в переключающих схемах. Применение в таких схемах совместно с туннельными диодами обычных транзисторов позволяет довольно просто получить высокие уровни рабочих напряжений, развязать входные и выходные цепи и осуществить операцию инверсии. Совместное использование туннельных диодов и транзисторов дает возможность создавать различные переключающие схемы с хорошими характеристиками.

На практике обычно используются две схемы комбинированного включения туннельного диода и транзистора: с общим эмиттером и общей базой. В схеме с общим эмиттером туннельный диод подключается параллельно выводам база — эмиттер транзистора (рис. 11,*а*). Статическая вольт-амперная характеристика такой ком-

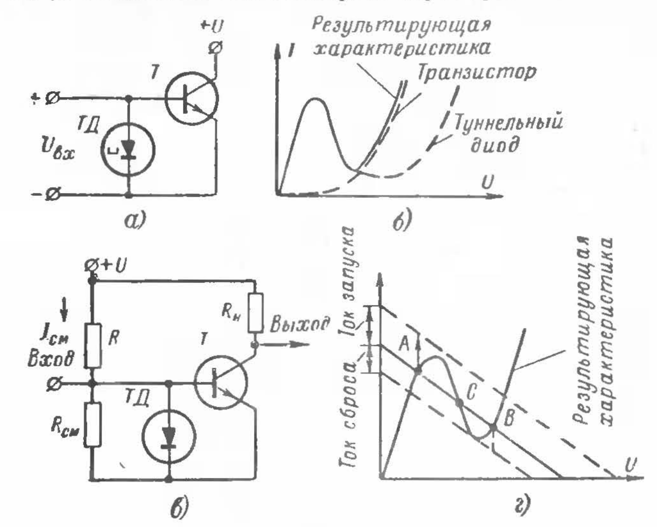


Рис. 11. Комбинированные схемы с общим эмиттером и их рабочие характеристики.

бинированной схемы приведена на рис. 11,*б*. Комбинированная схема с двумя устойчивыми состояниями показана на рис. 11,*в*. В ней напряжение и сопротивления в цепи смещения туннельного диода выбираются таким образом, чтобы нагрузочная линия пересекала вольт-амперную характеристику схемы в трех точках (*A*, *C*, *B* на рис. 11,*г*), в двух из которых (*A* и *B*) состояние равновесия схемы устойчивое. В исходном состоянии падение напряжения на туннельном диоде мало. Поэтому транзистор, к базе которого приложено это напряжение, находится в запертом состоянии. При подаче на вход туннельного диода положительного импульса рабочая точка схемы перемещается в точку *B* и туннельный диод переключается в новое устойчивое состояние с большим падением напряжения. Вследствие этого увеличивается напряжение эмиттер — база транзистора и он переходит в состояние насыщения. Таким образом, схема, показанная на рис. 11,*в*, осуществляет инверсию сигнала: при подаче на вход схемы положительного сигнала на выходе схемы напряжение отсутствует. Для приведения схемы в исходное состояние на вход ее должен быть подан отрицательный импульс сброса. В этом случае ток через туннельный диод уменьшается до

значения, меньшего $I_{мин}$ и рабочая точка вновь возвращается в точку A.

Рассмотренная схема имеет скорость переключения гораздо большую, чем схема на одних только транзисторах, так как туннельный диод уменьшает времена накопления и спада заряда, вследствие низкого сопротивления в момент переключения.

Сочетание туннельного диода с транзистором включенным по схеме с общим эмиттером, позволяет также получить одностабильную переключающую схему подобную приведенной на рис. 12,*а*. В этом случае напряжение питания и сопротивления резисторов в цепях смещения выбираются таким образом, чтобы нагрузочная линия пересекала вольт-амперную характеристику туннельного диода

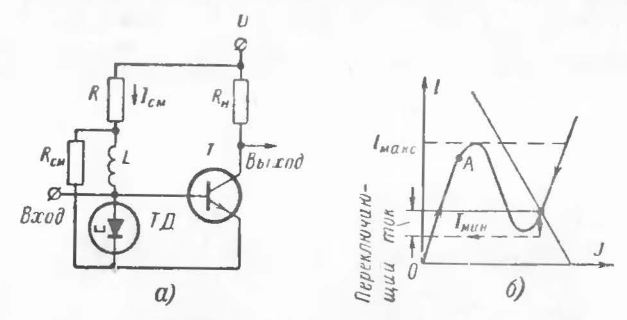


Рис. 12. Комбинированная схема с общей базой и ее рабочие характеристики.

только в одной точке (рис. 12,б), где состояние равновесия устойчивое. Таким образом, в исходном состоянии на туннельном диоде падение напряжения велико и транзистор находится в состоянии насыщения. При подаче отрицательного переключающего импульса туннельный диод переходит в состояние с малым падением напряжения и транзистор выключается. После этого из-за наличия индуктивности L ток через туннельный диод начнет постепенно увеличиваться до значения, соответствующего точке пересечения нагрузочной прямой и вольт-амперной характеристики туннельного диода. Однако при достижении током значения $I_{макс}$ туннельный диод перейдет в состояние с высоким падением напряжения, схема возвращается в исходную устойчивую точку, а транзистор включается и насыщается.

Обе рассмотренные схемы имеют два основных преимущества по сравнению со схемами, использующими только одни транзисторы. Во-первых, их скорость переключения и частота повторения значительно больше, чем у схем без туннельных диодов. Во-вторых, они значительно проще в конструктивном отношении и требуют меньшего числа компонентов.

Как уже отмечалось, помимо комбинированных схем с общим эмиттером существуют комбинации туннельных диодов с транзисторами, включенными по схеме с общей базой. В этом случае обеспечивается большее быстродействие. Поэтому для построения быстродействующих логических схем наиболее пригодными являются схемы с общей базой.

Вариант комбинированной переключающей схемы с туннельным диодом и транзистором, включенным по схеме с общей базой, приведен на рис. 13. Эта схема может выполнять логические операции *ИЛИ* и *И*.

Если схема выполняет операцию *И*, то при подаче на все входы схемы управляющих сигналов туннельный диод переключится в состояние с большим падением напряжения и весь ток потечет через эмиттерную цепь транзистора, что приведет к его насыщению. Если же хотя бы на одном входе схемы управляющий сигнал отсутствует, туннельный диод будет находиться в состоянии с малым падением напряжения и через него проходит весь ток схемы. В этом случае транзистор оказывается запертым.

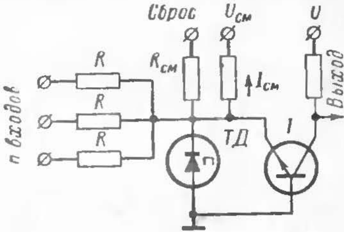


Рис. 13. Комбинированная схема переключения на туннельном диоде и транзисторе, включенных по схеме с общей базой.

Для выполнения логической операции *ИЛИ* смещение выбирается таким образом, чтобы при подаче управляющего сигнала на любой из входов туннельный диод переключался в состояние с большим падением напряжения и насыщал транзистор.

Время нарастания выходного импульса определяется временем переключения транзистора и выходной емкостью между коллектором и землей. Общее время задержки выходного сигнала по отношению к входному представляет собой сумму времени задержки туннельного диода, времени задержки включения транзистора и времени нарастания его импульса. В случае применения быстродействующих транзисторов с малой емкостью это время составляет порядка нескольких наносекунд.

Элементы памяти вычислительных устройств. Туннельный диод можно использовать в качестве ячейки памяти в вычислительных устройствах. Ячейка памяти, построенная на туннельных диодах, потребляет сравнительно мало энергии и обладает высокой скоростью работы. Последнее позволяет построить вычислительные машины с малым временем обращения к памяти.

Типичный переключающий элемент памяти на туннельных диодах приведен на рис. 14,*а*. Он состоит из двух туннельных диодов, образующих так называемую диодную пару Гото или твин-ячейку. Достоинство твин-ячейки заключается в том, что она позволяет получить почти вдвое больший перепад напряжения между двумя граничными состояниями схемы по сравнению с переключающими схемами на одном туннельном диоде. Твин-ячейка работает следующим образом. Если к точкам *а* и *в* приложить напряжения U_+ и U_-, равные по величине и противоположные по знаку, то создаваемое в точке *б* напряжение будет изменяться в зависимости от величины входного напряжения, как это показано на рис. 14,*б*, *в*. В том случае, когда питающие напряжения малы, рабочая точка каждого туннельного диода лежит на начальном участке вольт-амперной характеристики. Таким образом, потенциал точки *б* схемы оказывается равным нулю (рис. 14,*б*). При увеличении напряжения

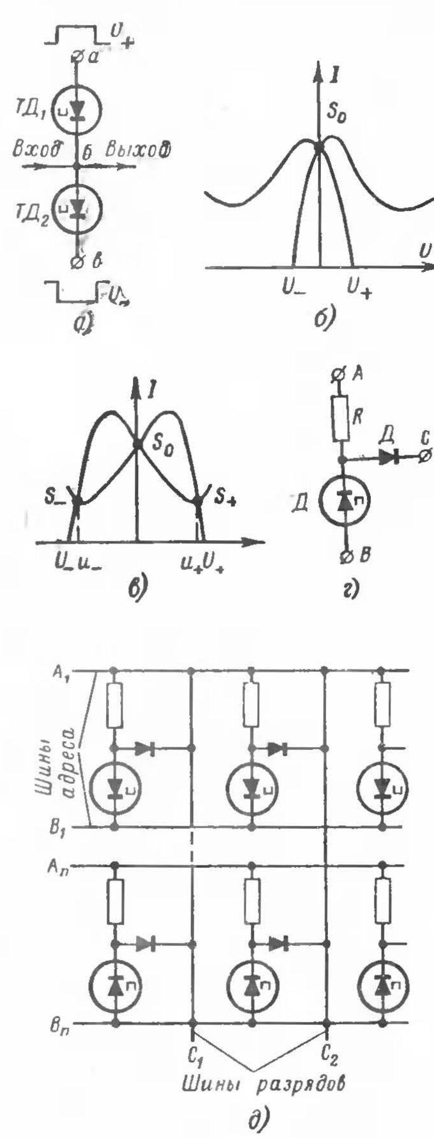


Рис. 14. Туннельный диод как элемент памяти.

питания появляется три точки пересечения вольт-амперных характеристик S_-, S_0, S_+ (рис. 14,*в*), одна из которых (S_0) соответствует нулевому потенциалу в средней точке схемы *б* (рис. 14,*а*) и является нестабильной, так как она находится на участке отрицательной проводимости. Поэтому нулевой потенциал в точке *б* изменится скачком либо до значения u_+, либо до u_- (рис. 14,*в*). Если оба диода одинаковы, то вероятность переключения схемы в то или иное положение одинакова. Поэтому если приложить даже небольшой управляющий сигнал, то схема всегда будет переключаться в определенное состояние.

К недостаткам твин-ячейки относится ее сравнительно высокая чувствительность к разбросу параметров элементов. В связи с этим величину управляющего тока приходится выбирать достаточно большой.

Память, построенная на рассмотренных элементах, применяется в основном для запоминающих устройств последовательного типа, а также для запоминающих устройств с небольшим объемом памяти. Для быстродействующей памяти большого объема наиболее удобной оказывается запоминающая ячейка, схема которой приведена на рис. 14,*г*. Каждая ячейка имеет три вывода: вывод *А*, на который подается напряжение питания (подключен к числовой линейке матрицы памяти), вывод *В*, подключенный к второй шине числовой линейки, и вывод *С*, подключенный как к усилителю разрядной записи (шина *С*), так и к усилителю считывания.

Принципиальная схема части матрицы устройства памяти, состоящей из рассмотренных ячеек, приведена на рис. 14,*д*. При считывании информации в соответствии с кодом числа выбирается шина *В*, на которую подается отрицательный импульс чтения. Если в ячейку был записан *0*, т. е. туннельный диод находился в состоянии с малым падением напряжения, то на выходе разряда появляется также отрицательный импульс. Этот импульс проходит на шину *С* через развязывающий диод.

В случае, если в ячейке была записана *1* (туннельный диод находился в состоянии с большим падением напряжения), а амплитуда импульса недостаточна для переброса рабочей точки туннельного диода в состояние *0*, то на выходной шине *С* сигнал считывания будет отсутствовать.

При записи, так же как и при считывании, производится выбор числовой линейки, в которую должна быть записана информация. Для записи в ячейку состояния *0* с соответствующей шины *А* матрицы снимается напряжение смещения, а на шину *В* подается отрицательный сигнал (последнее не обязательно). При записи состояния *1* по разрядным шинам *С*, где оно должно быть записано, подаются отрицательные импульсы.

Преобразователи постоянного тока в переменный. Новые источники энергии, такие как термоионные и термоэлектрические генераторы, аккумуляторы, работающие на морской воде, топливные элементы и солнечные батареи, потребовали создания эффективных способов преобразования постоянного тока в переменный. Хотя преобразователи на транзисторах по сравнению с преобразователями на туннельных диодах обладают большей эффективностью, они могут работать только при относительно высоких напряжениях (1 *в* и выше). При более низких входных напряжениях наибольшим эффектом обладают преобразователи на туннельных диодах: они работают при входных напряжениях от 0,1 до 0,65 *в*, причем к. п. д.

преобразования достигает 65%. Возможно получение выходной мощности порядка 100 *вт*.

На рис. 15,*а* и *б* представлены две наиболее общие схемы, применяемые для преобразования малого напряжения постоянного тока в высокое напряжение переменного тока. Схема на рис. 15,*а* по существу представляет собой релаксационный генератор на туннельном диоде. Процесс переключения у диодов, работающих в релаксационном режиме, иллюстрируется с помощью статической характеристики, приведенной на рис. 15,*в*. Пусть туннельный диод имеет смещение, выводящее рабочую точку в область отрицатель-

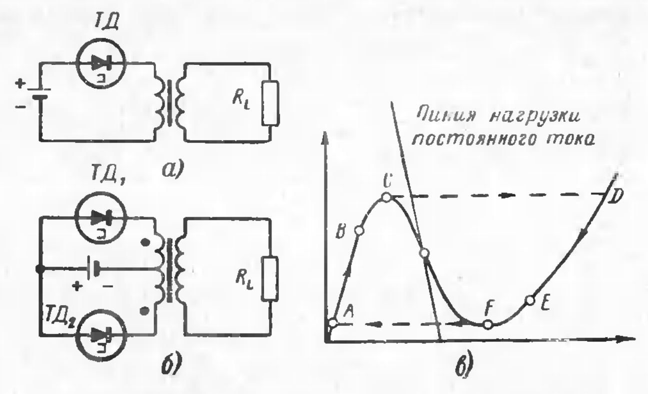


Рис. 15. Схема преобразователей напряжения.
а — последовательная; *б* — параллельная; *в* — рабочие характеристики.

ного сопротивления. Рассмотрим момент работы, когда диод находится в состоянии, определяемом точкой *C*. Из этого положения рабочая точка туннельного диода скачком перейдет в точку *D*, затем в точку *E*, а после этого несколько медленнее — в точку *F*. Затем происходит переброс в точку *A*. Из состояния, соответствующего точке *A*, диод быстро переходит в точку *B*, а из нее немного медленнее в *C*, после чего цикл повторяется. Форма выходного напряжения при этом будет трапецеидальной или почти прямоугольной.

Параллельная схема преобразователя, показанная на рис. 15,*б*, состоит из двух соединенных параллельно цепей. В каждой цепи по одному туннельному диоду, общий сердечник и общая вторичная обмотка трансформатора. Первичная обмотка состоит из двух половин, намотанных в противоположные стороны, и имеет вывод от средней точки. Важнейшей особенностью этой схемы является то, что диоды в ней синхронизированы; они генерируют на одной частоте, а не на разных, независимых одна от другой частотах. Таким образом, магнитные потоки в сердечнике складываются, а выходные напряжения суммируются. Параллельная схема позволяет получить бо́льшую выходную мощность, чем схема с одним туннельным диодом при тех же значениях максимального рабочего тока. Принцип действия параллельной схемы такой же, как и однодиодной.

Помимо рассмотренных схем, существует двухтактная схема преобразователя. Эта схема отличается от параллельной только направлением намотки половин первичной обмотки. В двухтактной схеме обе половины первичной обмотки наматываются в одном направлении. Материал сердечника трансформатора должен иметь прямоугольную петлю гистерезиса, хотя возможна работа двухтактной схемы и при использовании сердечников из обычных материалов. Эта схема может работать в двух основных режимах, причем выбор режима определяется применяемым трансформатором и нагрузочным сопротивлением.

В первом режиме, когда используется большой трансформатор с ненасыщенным сердечником, работа двухтактной схемы подобна работе схемы с одним диодом, за исключением того, что двухтактная схема преобразователя потребляет от источника питания постоянный, а не пульсирующий ток. При колебаниях напряжения смещения стабильность частоты преобразователя ухудшается.

Во втором режиме используется небольшой трансформатор с сердечником из материала с прямоугольной петлей гистерезиса. В течение каждого полупериода сердечник доводится до состояния насыщения. Этот режим отличается от режима с ненасыщенным сердечником тем, что форма выходного напряжения здесь ближе к прямоугольной, а частота ниже и более стабильна при изменениях входного напряжения или нагрузки.

Схемы с ненасыщенным и насыщенным сердечником могут генерировать колебания в двух режимах: симметричном (когда колебания, генерируемые двумя диодами, совпадают по фазе) и асимметричном (колебания сдвинуты на 180°). При симметричном режиме магнитные потоки, пронизывающие обмотки трансформатора, направлены навстречу друг другу и выходная мощность практически равна нулю. В асимметричном режиме магнитные потоки, образованные первичной обмоткой, складываются и на выходе преобразователя появляется полезная мощность. Сдвиг колебаний, генерируемых обеими обмотками, определяется сопротивлением нагрузки и взаимной индуктивностью между половинами первичной обмотки трансформатора. Было обнаружено, что колебания, генерируемые двумя диодами, совпадают по фазе в том случае, когда сопротивление нагрузки становится меньше некоторого критического значения. Это свойство двухтактной схемы обеспечивает превосходную защиту преобразователей от коротких замыканий. При коротком замыкании нагрузки (или при перегрузках) преобразователь переходит в симметричный режим и его выходная мощность падает до нуля. Если схема сконструирована правильно, то сразу после устранения перегрузки она будет возвращаться в асимметричный режим.

Работа преобразователя с насыщенным сердечником в асимметричном режиме происходит следующим образом. Предположим, что один диод только что переключился в положение, соответствующее максимальному току. При этом переключении в первичной обмотке индуктируется напряжение такого знака, что оно заставляет второй диод переключиться из положения максимального тока в положение минимального. Напряжение, индуцируемое при этом в первичной обмотке, имеет знак, обеспечивающий поддержание большого тока через первый диод и малого тока через второй диод. Это напряжение действует до тех пор, пока изменяется в сердечнике магнитный поток. Как только сердечник насыщается, напряже-

ние падает и диоды переключаются в противоположные состояния. Они остаются в этих состояниях до тех пор, пока сердечник в результате перемагничивания снова не окажется насыщенным. Затем цикл повторяется.

В заключение проведем некоторое сравнение рассмотренных схем преобразователей. Наиболее простой и надежной является однодиодная схема. Этот тип преобразователя рекомендуется для применения в тех случаях, когда к частоте и форме выходного напряжения не предъявляются жесткие требования, а напряжение постоянного тока изменяется. Параллельная схема преобразователя имеет те же преимущества, что и однодиодная схема, но более сложна. Такой преобразователь пригоден в тех случаях, когда требуемая выходная мощность больше той, которую можно получить с одним диодом. Двухтактная схема, работающая с ненасыщенным сердечником, применяется редко. Использование двухтактной схемы с насыщенным сердечником желательно в тех случаях, когда необходим максимальный к. п. д. или если преобразователь нагружен на выпрямитель, на выходе которого должны быть малые пульсации напряжения. Эту схему целесообразно применять, например, для питания радиопередатчика.

Глава вторая

ПОЛЕВЫЕ ПРИБОРЫ

Принцип действия и основные характеристики

Интенсивное развитие радиоэлектроники в последние годы привело к разработке ряда новых полупроводниковых приборов. Помимо обычных *p-n-p* и *n-p-n* транзисторов появились так называемые полевые приборы, отличающиеся как по принципу действия, так и по своим характеристикам и параметрам. Принцип действия полевых приборов основан на изменении сопротивления проводящего канала под действием электрического поля. Поэтому такие приборы стали называть полевыми. Вольт-амперные характеристики полевых приборов близки к характеристикам электровакуумных пентодов. При этом они сохраняют и все преимущества обычных транзисторов: малые габариты, незначительное потребление энергии, большую надежность и механическую прочность.

Действие полевого прибора рассмотрим с помощью модели, показанной на рис. 16,*а*. Основой прибора является пластина из полупроводникового материала *1* (например, германия) с дырочной проводимостью (*p*), ограниченная с обоих концов невыпрямляющими контактами *2*.

На верхней и нижней гранях пластины противоположно друг другу созданы методом вплавления или диффузии области *3* с электронной проводимостью (*n*). Эти области соединены между собой электрически и называются *затвором*.

Включим между невыпрямляющими контактами источник питания E. Через пластину германия начнет проходить ток, величина которого согласно закону Ома будет зависеть от сопротивления нагрузки и сопротивления пластины. Так как на границах между областями *p* и *n* образуются запирающие слои *4*, в которых носители тока практически отсутствуют, то ток, обусловленный источником E, может протекать не по всему сечению пластины, а лишь по

проводящему каналу, заключенному между запирающими слоями. Сечение проводящего канала может изменяться положительным, относительно пластины, напряжением E_1, приложенным между невыпрямляющим контактом и затвором. С увеличением напряжения происходит увеличение толщины запирающих слоев и сечение канала уменьшается. При уменьшении напряжения толщина запирающих слоев уменьшается и сечение канала увеличивается.

Так как сопротивление определяется сечением канала, то, изменяя напряжение источника E_1, можно управлять величиной тока,

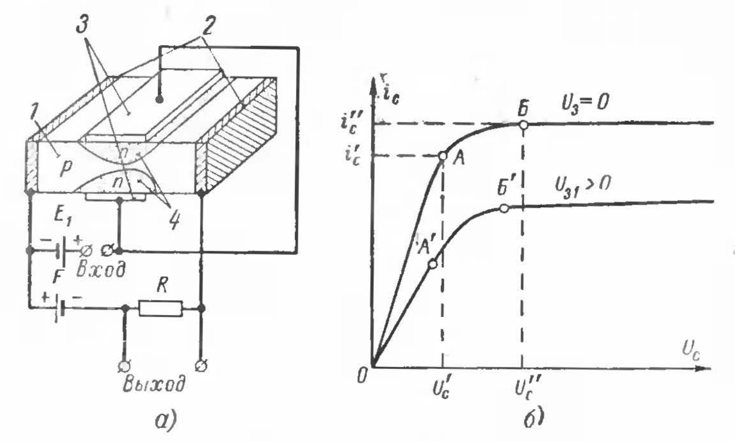


Рис. 16. Модель полевого прибора и его вольт-амперная характеристика.

проходящего между невыпрямляющими контактами и через сопротивление нагрузки R. При этом соответственно будет изменяться и падение напряжения на нагрузке, которое может быть снято с выходных зажимов прибора. При достаточно большой величине положительного напряжения на затворе сечение канала может быть уменьшено до нуля. Напряжение U_0, при котором канал будет полностью перекрыт запирающими слоями и ток через пластину станет равным нулю, называется напряжением отсечки.

Таким образом, рассмотренный полевой прибор ведет себя аналогично электровакуумному прибору, причем роль катода выполняет один из невыпрямляющих контактов, который называется *истоком*, а роль анода — другой невыпрямляющий контакт, называемый *стоком*. Затвор является аналогом управляющей сетки, а источники питания E и E_1 соответственно играют роль источников сеточного смещения и анодного напряжения.

Теперь перейдем к рассмотрению семейства статических характеристик полевых приборов, которые приведены на рис. 16,*б*. Предположим вначале, что исток и затвор прибора соединены накоротко, т. е. внешнее напряжение, обычно прикладываемое к этим электродам, равно нулю. Подадим на сток небольшое отрицательное по отношению к затвору напряжение. Тогда через прибор в направлении от истока к стоку начнет проходить ток. Этот ток вызывает

падение напряжения в канале, которое окажется запирающим для p-n перехода и, следовательно, приведет к тому, что ширина p-n перехода увеличится, а сечение токопроводящего канала соответственно уменьшится. Если мы теперь станем постепенно повышать напряжение стока, то это приведет к увеличению тока через прибор, увеличению падения напряжения в канале, расширению области p-n переходов, дальнейшему уменьшению сечения токопроводящего канала и росту его сопротивления. При изменении напряжения стока от 0 до величины U'_c (рис. 16,*б*) участок характеристики *OA* полевого прибора получается почти линейным, так как падение напряжения в канале мало изменяет ширину p-n перехода и сечение канала. Однако некоторое изменение сечения канала все же имеет место, и характеристика на участке *OA* не будет в точности следовать закону Ома.

Дальнейшее возрастание тока приводит к более заметному изменению сечения канала и к существенному изменению его сопротивления. Таким образом, увеличение напряжения стока приводит к возрастанию тока через канал до такой величины, при которой запирающее напряжение на p-n переходе начинает ограничивать рост тока i_c. Увеличение тока i_c с ростом напряжения U_c замедляется и, начиная с некоторого значения $U_c = U''_c$, практически прекращается. Дальнейшее повышение напряжения на стоке уже не приводит к росту тока, так как одновременно с повышением напряжения растет и сопротивление канала.

Напряжение стока, при котором ток стока достигает своего максимального значения $I_{макс}$, равно напряжению отсечки. Если теперь к затвору приложить внешнее запирающее напряжение, то ограничение роста тока стока произойдет при меньших значениях U_c. Это объясняется следующим образом. При подключении к затвору внешнего запирающего напряжения $U_{з1} > U_{з0}$ сечение канала уменьшается, а сопротивление его увеличивается. Поэтому начальный участок новой характеристики (*OA'*) при напряжении на входе $U_{з1} > U_{з0}$ будет иметь наклон, соответствующий большему сопротивлению. Так как внешнее запирающее напряжение уменьшает исходное сечение канала, влияние тока i_c начинает сказываться раньше и выход на нелинейный участок характеристики *A'Б'* (в область насыщения) произойдет при меньших значениях напряжения U_c и тока i_c. Область, в которой ток стока зависит от напряжения на стоке (на рис. 16,*б* слева от пунктирной линии), называется областью омического сопротивления, а область, в которой ток стока остается практически постоянным (на рис. 16,*б*—справа от пунктирной линии), — областью насыщения или пентодной областью. Наклон характеристики определяет внутреннее сопротивление полевого прибора R_0 в омической области и выходное сопротивление в пентодной области при различных напряжениях на затворе.

Как мы уже отмечали, характеристики полевых приборов аналогичны характеристикам электровакуумных пентодов. Поэтому усилительные свойства полевых приборов можно характеризовать таким хорошо известным из области электровакуумных приборов параметром, как крутизной вольт-амперной характеристики $S = \Delta I_c / \Delta U_з$. Численное значение крутизны зависит от напряжения на затворе. Максимальное значение крутизны $S_{макс}$ достигается при нулевом смещении на затворе. С увеличением запирающего смещения крутизна характеристики уменьшается по закону, близкому к квадратичному.

Мы рассмотрели принцип работы полевого прибора, канал которого выполнен из полупроводника с дырочной проводимостью (p). Работа полевого прибора с каналом типа n отличается только полярностью включения внешних напряжений. У такого прибора напряжение на стоке должно быть положительным, а на затворе — отрицательным относительно истока.

В полевых приборах в переносе тока через канал участвуют носители только одного знака (электроны в приборах с каналом типа n и дырки в приборах с каналом типа p). Поэтому полевые приборы часто называют униполярными приборами.

Характерной чертой полевых приборов является высокое входное сопротивление, которое определяется в основном сопротивлением p-n перехода затвора, смещенного в обратном направлении. На низких частотах оно составляет десятки мегом, что позволяет использовать полевые приборы в ряде схем, где применение обычных полупроводниковых приборов с низким входным сопротивлением связано со значительными трудностями. Частотные свойства полевых приборов определяются емкостью p-n перехода затвора и характеризуются зависимостью входного сопротивления от частоты.

Параметры полевых приборов зависят от температуры окружающей среды. Температурный диапазон, в котором могут работать эти приборы, определяется материалом полупроводника, из которого изготовлен канал прибора. Например, для кремниевых полевых приборов температурный диапазон составляет от —60 до +120° С, а для германиевых от —60 до +70° С. Следует отметить, что в указанном диапазоне температур напряжение отсечки изменяется не более, чем на 0,5 *в* для кремниевых приборов и еще меньше для германиевых. Ток насыщения и крутизна при увеличении температуры уменьшаются. Степень уменьшения тока насыщения и крутизны зависят от свойств полупроводника и режима, в котором работает прибор. Максимальное изменение тока насыщения у кремниевых полевых приборов составляет приблизительно 0,7—0,8% на 1° С. Изменение параметров полевых приборов с изменением температуры тем меньше, чем ниже напряжение отсечки данного прибора.

Разновидности полевых приборов

В настоящее время существует несколько конструктивных вариантов полевых приборов. Наибольшее распространение среди них получили текнетроны, алькатроны, однопереходные триоды[1] и полевые приборы с изолированным затвором.

Текнетрон представляет собой прибор, работающий в режиме переключения. Время переключения текнетрона менее 1 *мксек*, что дает возможность производить почти мгновенное управление схемами с высоким коэффициентом полезного действия. Свойства текнетрона позволяют использовать его в логических схемах, генераторах, преобразователях постоянного тока в переменный и в других схемах. По сравнению с мощными транзисторами применение текнетронов позволяет использовать более высокое рабочее напряжение, осуществлять сравнительно более легкое последовательное и параллельное их соединение. Текнетрон сохраняет более высо-

[1] В литературе часто встречается также название «двухбазовые диоды».

кую способность к перегрузкам и имеет большую скорость переключения. Характеристики текнетрона более стабильны при изменения температуры, а схема управления проще.

Схематически конструкция текнетрона приведена на рис. 17. Для его изготовления используется круглый стерженек, выполненный из германия типа *n* с удельным сопротивлением около 8 *ом/см*. Длина стерженька 2 *мм*, диаметр 0,5 *мм*. В середине стержня создается кольцевая проточка шириной 110 *мк* и диаметром углубления 60—80 *мк*. Поверхность проточки электролитическим способом покрывается индием, так что образуется кольцо шириной 90 *мк*. Кольцо из индия выполняет функции затвора. Никелевый электрод

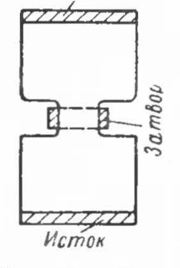
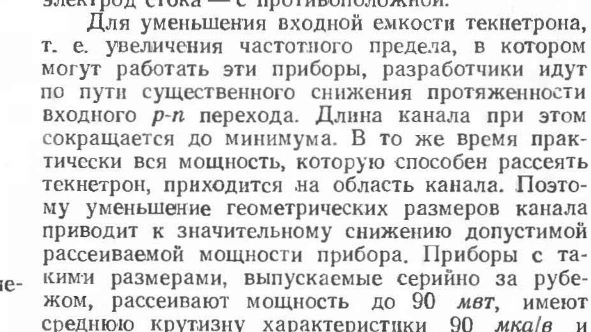


Рис. 17. Текнетрон.



истока припаивают с одного торца стержня, а электрод стока — с противоположной.

Для уменьшения входной емкости текнетрона, т. е. увеличения частотного предела, в котором могут работать эти приборы, разработчики идут по пути существенного снижения протяженности входного *p-n* перехода. Длина канала при этом сокращается до минимума. В то же время практически вся мощность, которую способен рассеять текнетрон, приходится на область канала. Поэтому уменьшение геометрических размеров канала приводит к значительному снижению допустимой рассеиваемой мощности прибора. Приборы с такими размерами, выпускаемые серийно за рубежом, рассеивают мощность до 90 *мвт*, имеют среднюю крутизну характеристики 90 *мка/в* и максимальную частоту генерации 110 *Мгц*.

Для увеличения допустимой мощности рассеяния текнетроны изготовляются не из одного германиевого стержня типа *n*, а из множества стержней, составляющих многослойную структуру между пластинами истока и стока прибора. Стержни изготовляются из германия типа *n* с относительно высоким удельным сопротивлением.

Такие приборы могут пропускать ток 10 *а* в непрерывном режиме и переключать токи более 15 *а*. Они рассчитаны на напряжение 150 *в* постоянного или переменного тока, имеют падение напряжения в прямом направлении менее 2 *в*, а остаточный ток не более 20 *ма*. Номинальное допустимое пиковое напряжение в обратном направлении составляет 300—400 *в*. Время включения менее 1 *мксек*, а время выключения в 10 раз меньше. Помимо текнетронов на ток 10 *а*, которые уже выпускаются некоторыми зарубежными фирмами, в настоящее время заканчивается разработка текнетронов на ток 50 *а*. Эти приборы предполагается выполнить как на основе германия, так и кремния. Кремниевые приборы будут работать при напряжениях до 500 *в* и иметь пиковое напряжение в обратном направлении до 1 000—1 200 *в*. Очень важным обстоятельством является тот факт, что мощность, переключаемая текнетронами, практически не ограничена, так как их можно включать параллельно без какого-либо подбора или подгонки.

Алькатрон. Стремление улучшить характеристики текнетрона и в первую очередь повысить его допустимую мощность рассеяния привело к созданию нового конструктивного варианта полевых приборов — алькатрона. Конструкция алькатрона схематически показана на рис. 18. В ней сток выполняется в виде диска и распо-

лагается в центре конструкции. Затвор и исток, представляющие собой концентрические кольца, находятся на периферии и окружают сток. Особенностью алькатрона является наличие четвертого электрода — престриктора, который существенно улучшает многие параметры прибора. Основное назначение престриктора заключается в сужении (престрикции) канала. Для этого на престриктор, являющийся слоем полупроводникового материала с проводимостью *p*, подается постоянное отрицательное смещение и канал сужается за счет расширения нижнего *p-n* перехода. Основным достоинством алькатрона по сравнению с текнетроном является значительно большая допустимая мощность рассеяния. Это объясняется, прежде всего, большим сечением канала, на котором может рассеиваться мощность. Кроме того, в алькатроне улучшены условия теплоотвода, благодаря наличию массивного престриктора. Кольцевая бороздка, на которую наносится индиевый электрод (затвор), создается с помощью струйного электролитического травления и имеет диаметр 2 *мм*, ширину 50 и глубину 50 *мк*. Расстояние между затвором и престриктором составляет около 40 *мк*. Диаметр престриктора около 2,5 *мм*. Образец с указанными

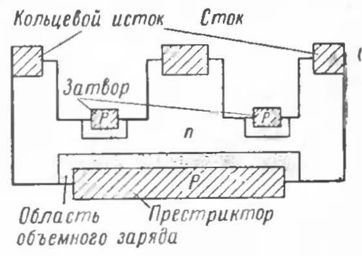


Рис. 18. Алькатрон.

габаритными размерами обладает следующими характеристиками: напряжение стока 50 *в*; ток стока 100 *ма*; отрицательное смещение на престрикторе 15 *в*; смещение на затворе 6 *в*; крутизна 6 *ма/в*; допустимая мощность рассеяния 5—6 *вт*; предельная частота 100—150 *Мгц*.

Характеристики алькатрона показывают, что кольцевой канал дает возможность существенно повысить рассеиваемую мощность при сохранении хороших частотных свойств. Крутизна алькатрона также оказывается выше крутизны текнетрона.

Однопереходный триод. При рассмотрении статических характеристик полевых приборов мы отмечали, что эти характеристики аналогичны характеристикам электровакуумных приборов. Однако эта аналогия является справедливой только при определенной полярности напряжения, приложенного между истоком и стоком. Если к стоку полевого прибора приложить не отрицательное относительно истока (рис. 16,*а*), а положительное напряжение, то это приведет к изменению направления тока в канале. Теперь уже падение напряжения в канале будет не запирающим для *p-n* перехода, а, наоборот, отпирающим. Поэтому получение семейства вольт-амперных характеристик с областью насыщения становится невозможным.

При некотором значении тока, протекающего через канал, отпирающее напряжение, создаваемое этим током, превысит внешнее запирающее напряжение, приложенное между истоком и затвором. Тогда *p-n* переход отопрется и входное сопротивление прибора резко упадет. Если мы теперь начнем повышать внешнее запирающее напряжение, то ширина *p-n* перехода практически меняться не будет. Аналогичный эффект мы получим и в том случае, когда напряжение между истоком и стоком будет иметь обычную поляр-

ность, а на затвор будет подано отпирающее для *p-n* перехода смещение. Изменение полярности напряжения на *p-n* переходе приводит к изменению принципа управления прибором. Теперь уже изменение толщины *p-n* перехода дает настолько ничтожный эффект, что его можно не учитывать.

В то же время *p-n* переход инжектирует в объем канала, электроны, которые являются для германия с дырочной проводимостью неосновными носителями. Увеличение концентрации неосновных носителей приводит к увеличению электропроводности канала, а следовательно, и тока через него. Практически в этом случае мы имеем новый прибор, управляемый током, который по своему принципу работы ближе к транзисторам, управляемым током, чем к вакуумной лампе. Поэтому затвор в таких приборах носит название эмиттера (Э), а сток и исток — соответственно база 1 ($Б_1$) и база 2 ($Б_2$) (рис. 19).

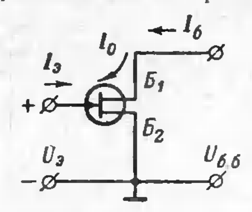


Рис. 19. Схема включения однопереходного транзистора.

Участок между $Б_1$ и $Б_2$ имеет линейную вольт-амперную характеристику, как обычное сопротивление. Это сопротивление называется межбазовым и при температуре 25° С составляет от 4,7 до 2,1 *ком*. Межбазовое сопротивление повышается линейно при увеличении температуры примерно до 140° С. Полярность напряжений и токов в однопереходных триодах с каналом типа *n* приведена на рис. 19. Если напряжение эмиттера $U_э$ меньше некоторого максимального значения $U_{э.макс}$, то переход эмиттер — база $Б_1$ смещен в обратном направлении и через него проходит только небольшой обратный ток утечки I_0. Когда напряжение $U_э$ достигнет значения $U_{э.макс}$, триод откроется. Во включенном состоянии сопротивление между эмиттером и базой $Б_1$ очень мало́, и ток эмиттера будет ограничиваться только внешним сопротивлением цепи эмиттера.

Полевые приборы с изолированным затвором

Следующим конструктивным вариантом полевых приборов являются приборы с изолированным затвором (ППИ). Отличительная черта таких приборов — отсутствие у них *p-n* перехода. Принцип действия ППИ основан на управлении объемным зарядом внутри полупроводника через слой диэлектрика толщиной 0,1—0,2 *мк*. ППИ по сравнению с рассмотренными ранее полевыми приборами обладают двумя существенными преимуществами. Во-первых, эти приборы имеют более высокое входное сопротивление (10^{12}—10^{14} *ом*) за счет изоляции затвора и, во-вторых — лучшие шумовые характеристики вследствие отсутствия *p-n* перехода.

Полевые приборы с изолированным затвором делятся на два типа: приборы с обеднением канала носителями и приборы с обогащением канала носителями. ППИ с обеднением называются такие приборы, у которых канал имеет значительную проводимость при напряжении на затворе, равном нулю. Если к затвору такого прибора приложить обратное смещение, то канал обеднится носителями, проводимость его упадет и при некотором напряжении на затворе наступит отсечка тока. Очевидно, что при подаче на затвор

прямого смещения прибор будет работать в режиме обогащения. Иными словами, для ППИ с обеденением характерно наличие рабочих областей как при положительном, так и при отрицательном напряжении на затворе (рис. 20,*а*).

ППИ с ничтожной проводимостью канала при напряжении затвора, меньшем напряжения отсечки, называются приборами с обогащением. При подаче на затвор такого прибора прямого смещения большего напряжения отсечки канал обогащается носителями и ток

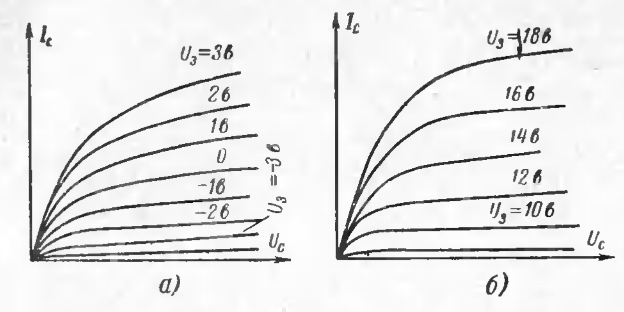


Рис. 20. Вольт-амперные характеристики полевых приборов с изолированным затвором.
а — с обеднением канала; *б* — с обогащением канала.

в цепи стока растет, о чем свидетельствует вольт-амперная характеристика, приведенная на рис. 20,*б*.

Напряжение отсечки тока стока является одним из основных параметров ППИ, поскольку знак этого напряжения определяет тип прибора. В случае канала *n* типа положительная величина напряжения отсечки указывает на прибор с обогащением, отрицательная — на прибор с обеднением.

Одной из разнодвидностей ППИ является разработанный фирмой CSF (Франция) статистор. В простейшей форме статистор состоит из полупроводникового стержня *1* (например, кремниевого), снабженного на концах омическими контактами — истоком *2* и стоком *3* (рис. 21). На поверхность полупроводника нанесен слой диэлектрика *4* (например, окиси кремния), поверх которого размещается затвор *5*. При приложении к затвору соответствующего напряжения в полупроводнике создается непроводящая зона, обедненная носителями заряда. Таким образом, приложение напряжения к затвору приводит к изменению площади сечения канала. При изготовлении статисторов могут применяться различные технологические методы — диффузионный, эпитаксиальный, планарный и др. Образцы статисторов имеют следующие средние параметры: напряжение, при котором ток стока достигает максимума, когда потенциал затвора имеет потенциал катода, равно 6—20 *в*; максимальный ток равен 200—800 *мка*; крутизна в режиме обогащения составляет 80—200 *мка/в*; крутизна в режиме обеднения достигает 80—180 *мка/в*.

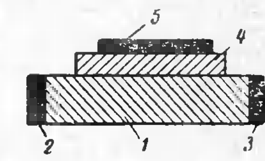


Рис. 21. Статистор.

Полевые приборы в переключающих схемах

Первоначально полевые приборы использовались главным образом в усилителях с линейными характеристиками. За последнее время эти приборы были технически усовершенствованы и теперь успешно работают в переключающих схемах. При использовании их в переключающих схемах отпадает необходимость в трансформаторной связи с цепями управления. Эта связь, как правило, бывает необходима при использовании в качестве прерывателей обычных транзисторов. Применение полевых приборов дает и другие преимущества по сравнению с использованием обычных биполярных транзисторов. Переключающие схемы на полевых приборах могут быть выполнены значительно меньших размеров. Они могут быть созданы либо из отдельных компонентов, либо выполнены в виде единого блока. Иногда сочетают оба метода. Небольшие изменения характеристик полевых приборов не влияют существенным образом на работу схемы, поэтому переключающие схемы, выполненные на них, обладают хорошей долговременной стабильностью.

К числу недостатков полевых приборов следует отнести их относительно высокое сопротивление во включенном состоянии. Обычно оно первышает 100 *ом*, т. е. на порядок больше, чем у транзисторов. Это обстоятельство следует учитывать при использовании полевых приборов в переключающих схемах. Тем не менее, как показала практика, переключающие схемы на полевых приборах работают достаточно хорошо.

Теперь мы перейдем к рассмотрению некоторых схем, в которых в качестве переключающих элементов используются полевые приборы. Естественно, что охватить в одной книге все возможные варианты использования полевых приборов в качестве переключающих элементов не представляется возможным, и поэтому мы ограничимся рассмотрением только наиболее распространенных из них.

Логические схемы. Полевые приборы могут быть успешно использованы для выполнения логических схем. Это прежде всего объясняется тем, что для переключения таких приборов из одного устойчивого состояния в другое требуется небольшой по величине управляющий (входной) сигнал. Основными логическими элементами, из которых могут быть построены сложные логические схемы, являются элементы *НЕ*, *И*, *ИЛИ*. Для того чтобы получить логический элемент с идеальной амплитудной харктеристикой (зависимость выходного напряжения от входного), подобно приведенной на рис. 22,*а*, необходимо добиться, чтобы полному размаху выходного напряжения соответствовало изменение входного напряжения в очень малом диапазоне. Более того, процесс изменения выходного напряжения должен происходить при входном напряжении, равном половине его возможной величины. Логический элемент такого типа является наиболее эффективным, так как для его переключения требуется управляющий сигнал минимальной амплитуды. Кроме того, исходный и конечный уровни управляющего сигнала могут устанавливаться с большими допусками.

Идеальную амплитудную характеристику логического элемента можно с достаточной точностью получить путем использования полевых приборов в сочетании с токоограничивающей нагрузкой. Схема такого логического элемента приведена на рис. 22,*б*. Она состоит из основного полевого прибора $ПП_1$ и токоограничителя $ПП_2$.

На рис. 22,*в* показано положение рабочей точки при переключении логического элемента. Оно определяется пересечением вольтамперных характеристик приборов $ПП_1$ и $ПП_2$, поскольку прибор $ПП_2$ является нагрузкой для $ПП_1$. В запертом состоянии, когда на выходе логического элемента напряжение практически отсутствует, рабочая точка находится в положении *1*. Как только на вход прибора $ПП_1$ подается запирающее напряжение, характеристика его опускается (на рис. 22,*в* показано пунктиром) и рабочая точка перемещается в положение *2*. В результате этого реализуется процесс, сходный с тем, который иллюстрируется графиком, приведенным на рис. 22,*а*. Схема, приведенная на рис. 22,*б*, является низкочастотной, и ее частотный предел обусловлен емкостью сток — затвор. Эта схема, кроме того, требует преобразования уровней напряжения, так как на входе схемы требуется напряжение отрицательной полярности, а с выхода схемы снимается напряжение положительной полярности. Поэтому в многокаскадной схеме после каждого каскада необходимо включать дополнительный элемент.

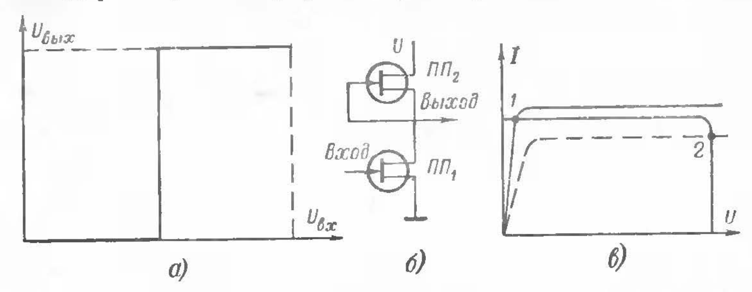


Рис. 22. Логический элемент и его амплитудные характеристики.

Устранить указанные выше недостатки можно путем незначительной модификации основного элемента. Для этого в схему, приведенную на рис. 22,б, вводится дополнительный каскад, представляющий собой истоковый повторитель. Истоковый повторитель может подключаться либо к входу схемы, как это показано на рис. 23,*а*, либо к выходу (рис. 23,*б*). В первом случае проблема преобразования уровня напряжения отпадает в связи с тем, что потенциал истока $ПП_1$ поддерживается выше потенциала земли за счет сопротивления резистора R_3. Вследствие этого истоковый повторитель и делитель напряжения R_1R_2 позволяют сделать потенциал затвора $ПП_1$ отрицательным по отношению к потенциалу источника питания. Делитель напряжения R_1R_2 служит для компенсации падения напряжения на полевом транзисторе. Такая схема позволяет реализовать логические функции *НЕ — ИЛИ* и *ИЛИ*. Однако количество входов в ней не должно превышать 3—5, так как для удовлетворительной работы схемы ток делителя напряжения должен лежать в довольно узких пределах.

Большее число входов допускает схема с включением истокового повторителя на выход, как это показано на рис. 23,*б*. Такое решение обеспечивает получение низкого выходного сопротивления, однако при этом требуется преобразование напряжения. В качестве элемента, используемого для преобразования напряжения, применен

стабилитрон *Д*. Таким образом, на выходе истокового повторителя достигается примерно полный размах напряжения.

На основе этой схемы могут быть построены логические элементы *НЕ—И* и *НЕ—ИЛИ*. Для этого необходимо соответствующим образом подобрать токи запирания основного и токоограничивающего приборов. На рис. 23,*в* показана схема, с помощью которой можно реализовать обе эти функции. Тип реализуемой функции определяется только выбором тока. Если токи всех полевых

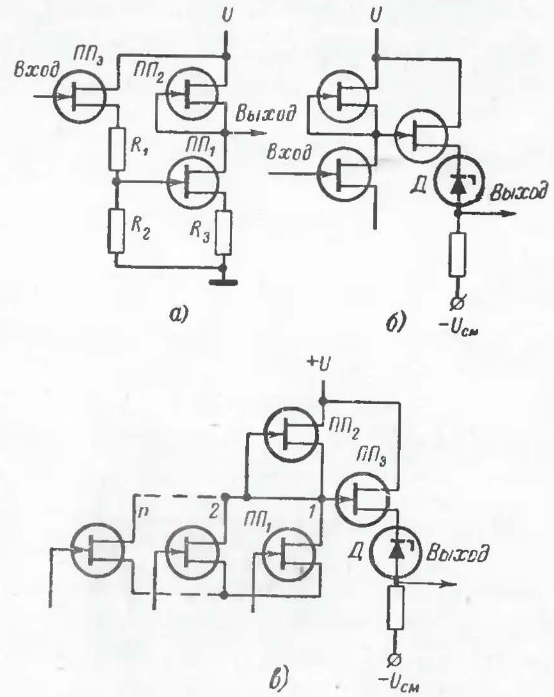


Рис. 23. Логические схемы с истоковым повторителем.

приборов (от 1 до *n*) выбраны с таким расчетом, что их сумма превосходит ток через $ПП_2$ в том случае, когда все они отперты, и меньше этой величины, когда хотя бы один из них заперт, то схема реализует функцию *НЕ—И*. Однако если ток стока любого из полевых приборов от 1 до *n* превосходит ток $ПП_2$, схема реализует функцию *НЕ—ИЛИ*.

Следует отметить, по быстродействию рассмотренные схемы не могут конкурировать со схемами на обычных транзисторах. Их частотный диапазон ограничен несколькими сотнями килогерц. Однако в тех случаях, когда быстродействие не является определяющим фактором, преимущества таких схем могут быть полностью использованы. Основными из них являются возможность непосредствен-

ного соединения полевых приборов между собой по постоянному току и низкий уровень мощности рассеяния.

Переключатели. Поскольку полевые приборы являются устройствами, способными принимать два устойчивых состояния (проводящее и запертое), они могут быть использованы в качестве переключателей. В этом параграфе мы рассмотрим схемы, в которых полевые приборы выполняют те же функции, что и различные механические и электромеханические переключатели.

Переключатель постоянного тока. На рис. 24,*а* приведена схема статического переключателя постоянного тока. Эта схема состоит из полевого прибора (текнетрона или алькатрона) и электронного пере-

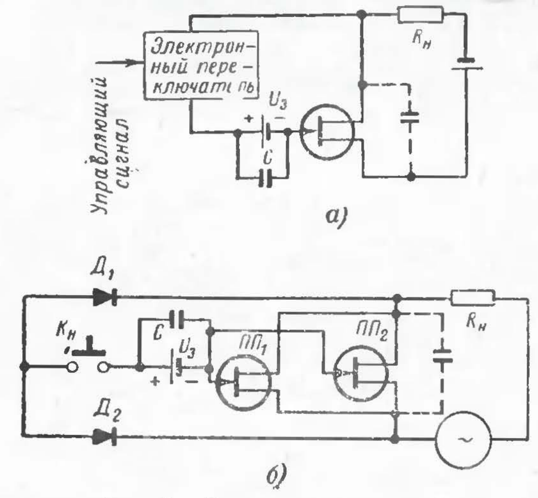


Рис. 24. Схемы переключателей.
а — постоянного тока; *б* — переменного тока.

ключателя, управляющего цепью затвора. В качестве электронного переключателя наиболее целесообразно использовать быстродействующий маломощный тиристор. Когда тиристор находится в выключенном состоянии, запирающее напряжение между затвором и стоком полевого прибора отсутствует и через него проходит полный ток нагрузки. При переключении тиристора в проводящее состояние между затвором и стоком прикладывается запирающее напряжение $U_з$, которое переводит полевой прибор в состояние отсечки.

Для того чтобы осуществить надежное переключение полевого прибора, тиристор должен переводиться в проводящее состояние за минимальное время, а пиковый ток в нем при этом должен достигать одной трети части тока нагрузки. В запертом состоянии тиристор должен выдерживать напряжение отсечки затвора полевого прибора. Так, например, полевой прибор, переключающий ток до 30 *а*, может управляться тиристором, рассчитанным на ток 0,5 *а* и напряжение 100 *в*.

Если нагрузка имеет значительную индуктивность, то в цепь затвора дополнительно вводится *RC* цепочка, увеличивающая скорость нарастания напряжения отсечки на затворе. С другой сто-

роны, свойственные полевым приборам короткие времена выключения (порядка 0,1 *мксек*) могут привести к значительным выбросам напряжения на нагрузке. Поэтому между стоком и истоком полевого прибора часто включается емкостный шунт (на рис. 24 показан пунктиром), который уменьшает скорость нарастания напряжения на нагрузке.

Переключатель переменного тока. Схема для переключения переменного тока приведена на рис. 24,*б*. Она состоит из двух полевых приборов $ПП_1$ и $ПП_2$, включенных встречно-параллельно (исток $ПП_1$ соединен со стоком $ПП_2$ и наоборот) по схеме с общим затвором и переключателя (на рис. 24,*б* для простоты показан механический переключатель). Если механический переключатель разомкнут, то на затворе полевых приборов отсутствует смещение и через каждый из них в соответствующий полупериод переменного напряжения протекает полный ток нагрузки. В положительный полупериод в проводящем состоянии находится полевой прибор $ПП_1$, так как к его истоку прикладывается положительное напряжение, а к стоку отрицательное. Прибор $ПП_2$ в это время заперт вследствие того, что его исток отрицательнее стока. В отрицательный полупериод приборы $ПП_1$ и $ПП_2$ меняются ролями. При замыкании механического переключателя $К_н$ между затворами и истоками $ПП_1$ и $ПП_2$ прикладывается запирающее напряжение, и оба эти прибора переводятся в состояние отсечки. Запирающее напряжение в цепи затвора прикладывается через два диода $Д_1$ и $Д_2$, которые развязывают цепи затвора от сильноточной цепи нагрузки. В рассматриваемой схеме для переключения переменного тока не требуется специальных схемных приемов. Необходимо только монтировать оба полевых прибора на отдельных теплоотводах, изолированных друг от друга. Механический переключатель в цепи затвора, показанный на рис. 24,*б*, может быть заменен электронным. Эта схема является одним из идеальных вариантов бесконтактного выключателя. Она исключает возможность прилипания, отскакивания и истирания контактов, что обычно наблюдается при работе электромеханических реле и контактов. В схемах такого типа для управления большими мощностями могут быть использованы сравнительно слабые сигналы.

Аналоговые переключатели. Аналоговые переключатели находят широкое применение во многих узлах современных систем обработки данных: в многоканальных переключателях, в модуляторах и прерывателях, в преобразователях величин из аналоговой формы в цифровую и в аналоговых вычислительных машинах. Аналоговый переключатель либо передает сигнал без искажений, либо полностью блокирует его. Рассмотрение аналоговой схемы управления пропусканием сигналов начнем с простейшего последовательного переключателя, показанного на рис. 25,*а*. В этой схеме входной сигнал подается на исток, а сток соединен с выходной шиной.

Пусть входное напряжение переключателя $U_{вх}$ изменяется в пределах от 0 до $U_{макс}$. Тогда чтобы заблокировать прохождение сигнала в нагрузку, к затвору полевого прибора должно быть приложено управляющее напряжение $U_у=U_{макс}+U_з$ ($U_з$ — напряжение запирания полевого прибора). Если же мы хотим, чтобы входной сигнал был передан без искажений в нагрузку, то к затвору полевого прибора следует приложить управляющее напряжение, равное по величине $U_{макс}$. В этом случае при входном напряжении сигнала, равном нулю, затвор полевого прибора окажется под

запирающим напряжением $U_{макс}$ и будет находиться в состоянии отсечки. В результате напряжение на выходе переключателя также окажется равным нулю. При увеличении $U_{вх}$ до значения $U_{макс}$ напряжения истока и затвора сравняются и полевой прибор перейдет в состояние проводимости. Напряжение на выходе переключателя станет равным величине $U_{макс}$ минус падение напряжения на открытом полевом приборе, которое определяется напряжением между истоком и затвором. Таким образом мы видим, что напряжение на выходе переключателя равно нулю при $U_{вх}=0$ и максимально при $U_{вх}=U_{макс}$, т. е. входной сигнал передается без искажений. Рассматриваемая схема позволяет получить большие скорости пе-

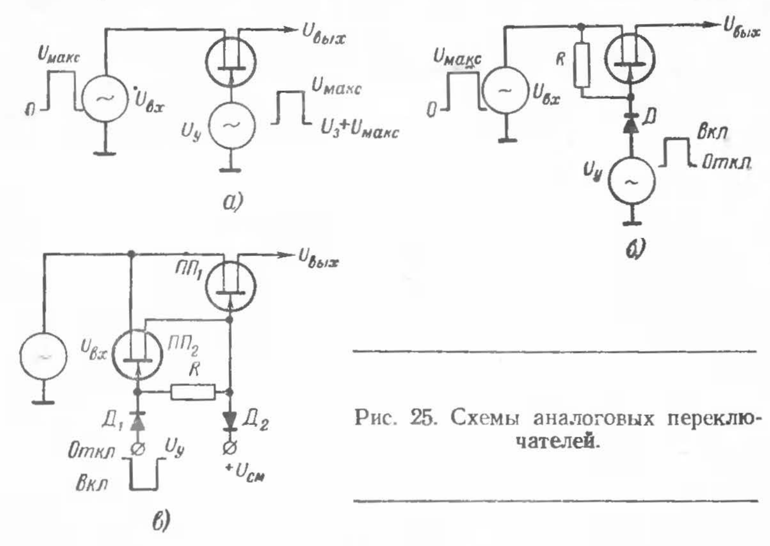


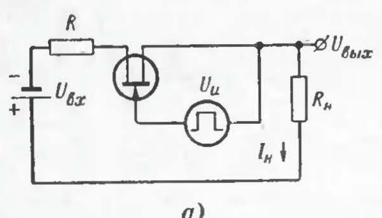
Рис. 25. Схемы аналоговых переключателей.

реключений, поскольку затвором может управлять быстродействующий переключатель. Однако эта схема обладает тем недостатком, что в ней не обеспечивается гарантированное равенство нулю напряжения затвора, а следовательно, и минимальное падение напрянапряжения на отпертом полевом приборе.

Для того чтобы обеспечить равенство нулю напряжения затвора при любом входном сигнале, в рассмотренную схему дополнительно включаются шунтирующий резистор R и диод $Д$ (рис. 25,*б*). В этом случае, когда управляющее напряжение на затворе отрицательно, диод $Д$ находится под действием запирающего смещения и можно считать, что на затворе и истоке одно и то же напряжение. Поэтому падение напряжения на полевом приборе минимально. Прибор переводится в непроводящее состояние положительным управляющим напряжением затвора. Скорость срабатывания цепи затвора зависит от сопротивления резистора R.

В некоторых случаях вместо резистора R включается дополнительный полевой прибор, как это показано на рис. 25,*в*. В этой схеме в качестве переключающего элемента используется полевой прибор $ПП_1$, а вместо резистора R—прибор $ПП_2$. Последний препятствует прохождению избыточного тока в цепи сигнала. Управляю-

щее напряжение на затворе $ПП_2$ положительно и достаточно велико, чтобы поддержать его в запертом состоянии. На затворе $ПП_1$ также имеется положительное смещение, достаточное для поддержания его в запертом состоянии. Когда управляющее напряжение отрицательно, диоды $Д_1$ и $Д_2$ заперты, напряжение затвора $ПП_2$ уменьшается до нуля и поэтому падение напряжения на нем мало. Прибор $ПП_1$ включается прибором $ПП_2$. Диоды $Д_1$ и $Д_2$ изолируют включенный канал от схемы управления. Скорость переключения и мощность, рассеиваемая во включенной схеме, определяются сопротивлением резистора R. Таким переключателем можно управлять от одного источника напряжения, к параметрам которого не предъявляются жесткие требования.



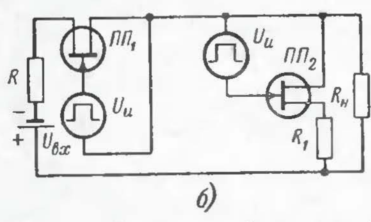


Рис. 26. Схемы преобразователей постоянного тока в переменный.
а — последовательная; *б* — последовательно-параллельная.

Преобразователи постоянного тока в переменный. Полевые приборы могут быть использованы в качестве преобразователей постоянного тока в переменный. В основе работы преобразователей лежит принцип прерывания постоянного тока. Чтобы преобразователь работал с минимальными потерями, прерывающее устройство должно иметь бесконечно большое сопротивление в состоянии «выключено» и бесконечно малое в состоянии «включено».

Подобными характеристиками обладают полевые приборы, работающие в режиме переключения. Состояние «выключено» соответствует отсутствию тока стока, когда сопротивление полевого прибора достигает максимального значения. В состоянии «включено» полевой прибор работает в области насыщения, где его сопротивление минимально. Таким образом, при максимальном напряжении на стоке ток стока будет близок к нулю, а при протекании максимального тока падение напряжения на полевом приборе очень мало. Потери в обоих состояниях будут незначительны. Для получения преобразователя с высоким к. п. д. необходимо создать такую схему, в которой время переходного процесса от одного состояния к другому было бы возможно короче. Чтобы выполнить это требование, нужно иметь генератор напряжения прямоугольной формы.

На рис. 26,*а* приведена схема простейшего последовательного преобразователя, состоящего из источника постоянного напряжения $U_{вх}$ с внутренним сопротивлением R, прерывателя постоянного тока на полевом приборе, источника переключающих импульсов $U_и$ и сопротивления нагрузки $R_н$. Когда напряжение между затвором и стоком равно нулю, полевой прибор открыт и сопротивление его канала минимально. Выходное напряжение преобразователя отличается от входного на величину падения напряжения на отпертом

полевом приборе. Так как сопротивление канала включенного полевого прибора чисто активное, нулевому напряжению на входе соответствует нулевое напряжение на выходе, т. е. сдвиг по фазе отсутствует. Когда напряжение на затворе полевого прибора достигает напряжения отсечки, сопротивление канала становится максимальным и напряжение на выходе преобразователя оказывается равным нулю.

Основным показателем преобразователя, предназначенного для усиления малых сигналов постоянного тока, служит величина искажения выходного сигнала.

Основные причины, приводящие к искажению сигнала, следующие:

1. Когда полевой прибор находится в проводящем состоянии, его остаточное сопротивление изменяется с температурой, что может привести к нелинейной зависимости выходного напряжения от входного. Чем меньше остаточное сопротивление по сравнению с $R_н$, тем меньше искажение выходного сигнала, вызванное влиянием температуры.

2. Когда полевой прибор заперт, то в цепях затвор — исток и затвор — сток протекают токи утечки, которые возрастают с температурой быстрее, чем в обычных транзисторах. Например, при изменении температуры от 25 до 100° С ток возрастает в 8 раз. Поэтому обычный преобразователь на полевом приборе с $R_н=100$ *ком* и $I_н=1$ *ма* (при комнатной температуре) в указанном температурном диапазоне имеет дрейф выходного напряжения, равный 8 *мв*. Такой большой дрейф недопустим в схемах с малым уровнем сигналов.

3. За счет емкости затвор — исток, которая создает связь между источником прямоугольных сигналов и нагрузкой на выходе прерывателя, появляется напряжение, обусловленное переходными процессами. Однако, поскольку емкость затвор — исток является по существу емкостью запирающего слоя диода, ее изменение с изменением температуры крайне незначительно.

Уменьшение искажений выходного сигнала может быть достигнуто различными методами. Нелинейность, обусловленная температурными изменениями остаточного сопротивления полевого прибора, может быть уменьшена: путем увеличения сопротивления нагрузки $R_н$; за счет использования полевых приборов с большой крутизной (например, 10 000 *мка/в*) и, следовательно, с малым остаточным сопротивлением; путем температурной компенсации изменения остаточного сопротивления с помощью термистора.

Искажения вследствие нелинейной зависимости выходного напряжения преобразователя от входного обычно много меньше искажения, обусловленного токами утечки. Для уменьшения последнего могут быть использованы следующие пути:

1) уменьшение $R_н$;

2) термостатирование. Если рабочая температура будет поддерживаться в пределах 35 ± 2° С, то для кремниевых полевых приборов, имеющих при комнатной температуре $I_н=1$ *на*, дрейф не будет превосходить ±200 *мкв* при $R_н=100$ *ком*;

3) отбор полевых приборов с малыми токами утечки. Результаты измерения показали, что в большинстве случаев токи утечки на порядок меньше максимальных норм, указанных изготовителями полевых приборов;

4) применение последовательно-параллельной схемы для балан-

сировки токов утечки двух полевых приборов. Эта схема приведена на рис. 26,*б* и работает следующим образом. Напряжение на каждом полевом приборе подбирается таким образом, что $ПП_1$ закрыт, когда $ПП_2$ открыт, и наоборот. В положении, когда $ПП_1$ открыт, а $ПП_2$ закрыт, цепь ведет себя подобно последовательному соединению полевого прибора и нагрузки $R_н$ и искажение будет обусловлено током утечки $ПП_2$, протекающим через остаточное сопротивление $ПП_1$ и внутреннее сопротивление источника переключающих импульсов, которые малы.

В положении, когда $ПП_1$ закрыт, а $ПП_2$ открыт, напряжение сигнала на выходе отсутствует и искажение обусловлено током, протекающим через резистор R_1 и открытый прибор $ПП_2$. Так как для малых значений R обе составляющие тока малы, то вызванный утечкой дрейф снижается без потери линейности.

Таким образом, осталось рассмотреть только уменьшение искажений выходного сигнала, связанных с влиянием переходных процессов. Хотя переходные процессы не являются серьезной проблемой в преобразователях на полевых приборах, тем не менее их влияние желательно уменьшить. Для этого необходимо: выбирать полевые приборы с малым значением емкости затвор — исток (в настоящее время уже имеются приборы, у которых емкость затвор — исток не превышает 4 *пф*); выбирать полевые приборы с малым напряжением отсечки для уменьшения амплитуды запускающего импульса; тщательно выполнять монтаж; использовать последовательно-параллельную схему.

Генераторы. Для построения генераторов обычно используются однопереходные триоды. На рис. 27,*а* приведена схема релаксационного генератора. Там же показаны типичные осциллограммы напряжений в различных точках схемы. Схема работает следующим образом. При включении напряжения источника питания конденсатор C_1 начинает заряжаться через резистор R_1 до значения напряжения на эмиттере $U_э=U_{э.макс}$. В этот момент однопереходный триод включается и разряжает конденсатор C_1 через резистор $R_{б1}$. Когда напряжение на эмиттере достигает некоторого минимального значения (порядка 2 *в*), эмиттер перестает проводить, однопереходный триод отключается и цикл повторяется вновь.

Значения параметров здесь могут быть различными. Обычно сопротивление резистора $R_{б1}$ не превышает 100 *ом*, хотя в некоторых случаях возможны значения до 2—3 *ком*. Сопротивление резистора R_1 может лежать в пределах между 3 и 500 *ком*. В противном случае однопереходный триод в схеме, приведенной на рис. 27,*а*, не будет выключаться. Выбор верхнего сопротивления резистора R_1 обусловливается требованием, чтобы ток, протекающий через эмиттер в пиковой точке, был больше тока $I_{э.макс}$. В этом случае будет гарантия, что однопереходный триод включится. Рекомендуемый диапазон питающего напряжения находится в пределах 10—35 *в*. Этот диапазон определяется снизу приемлемой величиной амплитуды сигнала, а сверху — допустимым рассеянием мощности однопереходного триода.

При использовании двух однопереходных триодов может быть построена схема генератора попеременных импульсов (рис. 27,*б*). Она состоит из двух релаксационных генераторов, синхронизированных конденсатором C_3. Каждый раз, когда один из однопереходных триодов отпирается, к эмиттеру другого прикладывается отрицательный скачок напряжения через емкостный делитель напряжения, образуемый конденсаторами C_3 и C_1 или C_3 и C_2. Если этот отрицательный скачок напряжения появится в тот момент, когда напряжение на эмиттере имеет низкое значение, то задержка в отпирании будет меньше, чем когда напряжение на эмиттере более высокое. Этот эффект объясняется нелинейностью цепи заряда конденсатора C_3 и обеспечивает синхронизацию двух генераторов. Частота колебаний и фазовый сдвиг между импульсами на двух выходах регулируются независимо друг от друга потенциометрами R_1 и R_2. В рассматриваемой схеме частота может регулироваться в пределах от 200 до 800 *гц*, а сдвиг между импульсами от 35 до 65% от длительности периода. Диапазон регулирования фазового сдвига между импульсами можно увеличить, уменьшив емкость C_3 относительно C_1 и C_2.

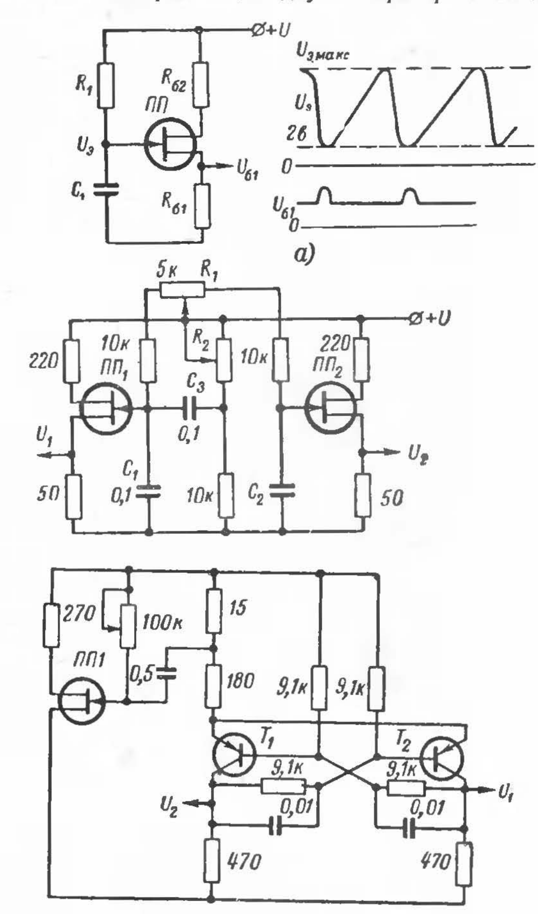


Рис. 27. Схемы генераторов.

а — релаксационный генератор; *б* — генератор переменных импульсов; *в* — генератор противофазных прямоугольных импульсов.

На основе однопереходного триода в сочетании с обычными транзисторами можно построить схему генератора для получения противофазных прямоугольных импульсов (рис. 27,*в*). Такая схема имеет два выхода. Триоды T_1 и T_2 образуют простую триггерную схему, которая запускается от релаксационного генератора на однопереходном триоде. Отрицательные импульсы образуются на резисторе 15 *ом* каждый раз, когда однопереходный триод отпирается. Частота колебаний может изменяться с помощью переменного резистора 100 *ком* примерно от 20 до 600 *гц*; причем форма выходного напряжения сохраняется идеально симметричной в пределах всего диапазона частот.

Глава третья

ДИНИСТОРЫ

Общие замечания

В 1956 г., впервые были описаны двухэлектродные полупроводниковые приборы, состоящие из четырех последовательно чередующихся областей с проводимостью *p* и *n* типа. Эти приборы в дальнейшем стали называться динисторами. Характериой особенностью динистора является наличие на его вольт-амперной характеристике участка с отрицательным сопротивлением. Это обстоятельство делает динистор удобным для применения в схемах генераторов, усилителей и различного рода переключающих устройств. Применение нелинейных отрицательных сопротивлений в генераторных и усилительных схемах значительно упрощает их, так как отпадает необходимость в цепи внешней обратной связи. Полупроводниковый прибор с отрицательным сопротивлением в некоторых случаях может заменить радиоэлектронные узлы.

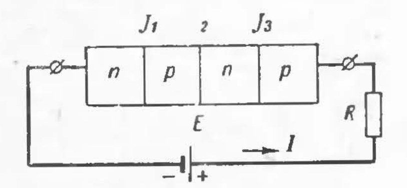


Рис. 28. Структурная схема динистора.

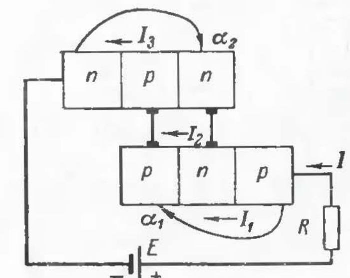


Рис. 29. Схема замещения динистора с помощью триодов *p-n-p* и *n-p-n* типа.

Эквивалентная схема и вольт-амперная характеристика. Динистор представляет собой полупроводниковую структуру, состоящую из трех последовательно соединенных электронно-дырочных переходов (рис. 28). Если к динистору приложить напряжение так, как это показано на рис. 28, то *p-n* переходы j_1 и j_3 окажутся смещенными в прямом, а j_2 — в обратном направлениях.

Для пояснения принципа действия динистора удобно пользоваться эквивалентной схемой, составленной из двух транзисторов *p-n-p*

и *n-p-n* типа (рис. 29). Транзисторный эквивалент, выполненный на кремниевых транзисторах П103 (*n-p-n* транзистор) и П106 (*p-n-p* транзистор) обладает хорошими переключающими свойствами и вольт-амперной характеристикой, близкой к характеристике динистора.

Переход j_2 является коллектором для *n-p-n* и *p-n-p* транзисторов, и через него будет проходить ток $I_1\alpha_1+I_3\alpha_2$, где α_1 — коэффициент усиления по току транзистора *p-n-p*, а α_2 — коэффициент усиления по току транзистора *n-p-n*. Помимо этого, через переход j_2 проходит ток утечки $I_{к0}$.

Коэффициенты усиления по току α_1 и α_2 возрастают при увеличении тока (в области малых токов). При достаточно высоком напряжении смещения в переходе j_2 происходит лавинообразное умножение числа носителей заряда, что приводит к резкому возрастанию тока, проходящего через прибор. Пробой перехода наступает тогда, когда величина произведения $(\alpha_1+\alpha_2)$ *M* превышает значение единицы (*M* — коэффициент умножения). При этом средний переход оказывается смещенным в прямом направлении. В полностью включенном состоянии сумма коэффициентов α_1 и α_2 равна единице.

Рис. 30. Вольт-амперная характеристика динистора.

Вольт-амперная характеристика динистора (рис. 30) может быть разбита на пять участков. Участок низкой проводимости *I* характеризуется постоянным значением протекающего через динистор тока. Дифференциальное сопротивление на этом участке велико, и ток через прибор не превышает единиц микроампер. Участок *II* характеризуется малым положительным дифференциальным сопротивлением, которое резко изменяется от десятков мегом до нуля, т. е. этот участок является переходным между участком низкой проводимости *I* и участком *III*, где дифференциальное сопротивление отрицательно. При значениях тока, соответствующих началу участка *II*, начинает действовать внутренняя положительная обратная связь по току. Ток резко возрастает, и дифференциальное сопротивление уменьшается. Значение тока $I=I_{вкл}$ соответствует началу участка *III*, где дифференциальное сопротивление имеет отрицательный знак.

Участок *IV* характеризуется высокой проводимостью. Дифференциальное сопротивление здесь положительно и не превышает единиц ома. Падение напряжения, соответствующее участку *IV*, приблизительно одинаково для различных типов динисторов и равно 0,5—2 *в*. Участок *V* представляет обратную ветвь вольт-амперной характеристики динистора. На этом участке дифференциальное сопротивление положительно и по порядку величины соответствует дифференциальному сопротивлению на участке *I*. Напряжение пробоя $U_{пр}$, ограничивающее участок *V*, у большинства динисторов превышает напря-

Таблица 3

Электрические параметры динисторов

Параметры	Тип динистра							
	Д228А	Д228Б	Д228В	Д228Г	Д228Д	Д228Е	Д228Ж	Д228И
Остаточное напряжение $U_{ост}$ (не более), *в*	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Напряжение переключения $U_{вкл}$, *в*	10—20	14—28	20—40	28—56	40—80	56—112	80—160	100—200
Ток переключения $I_{вкл}$ (не более), *ма*	1	1	1	1	1	1	1	1
Ток выключения $I_{выкл}$ (не более), *ма*	15	15	15	15	15	15	15	15
Ток утечки $I_{ут}$ (не более), *мка*	60	60	60	60	60	60	60	60
Обратный ток $I_{обр}$ (не более), *ма*	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Максимальный постоянный ток $I_{макс}$, *ма*	50	50	50	50	50	50	50	50
Максимальный импульсный ток $I_и$, *а**:								
при длительности импульса $\tau_и \leqslant 10$ *мсек*	2	2	2	2	2	2	2	2
при длительности импульса $\tau_и \leqslant 10$ *мксек*	10	10	10	10	10	10	10	10
Время включения $\tau_{вкл}$ (не более), *мксек*	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Время выключения $\tau_{выкл}$ (не более), *мксек*	5	5	5	5	5	5	5	5
Емкость диода $C_д$ (не более), *пф*	80	80	80	80	80	80	80	80
Максимальная температура корпуса $t_к$, °C	+100	+100	+100	+100	+100	+100	+100	+100

* При среднем токе через прибор не более 50 *ма*. При длительности импульса $\tau_и = 10$ *мксек* ÷ 10 *мсек* значение максимального тока определяется по формуле равным $12{,}7 - 2{,}7 \lg \tau_и$, где ток I — в амперах, $\tau_и$ — в микросекундах.

Примечание. Величины $U_{ост}$, $I_{вкл}$, $I_{выкл}$, $I_{ут}$, $I_{обр}$, $\tau_{вкл}$, $\tau_{выкл}$, $C_д$ приведены в интервале рабочих температур.

Таблица 4

Электрические параметры динисторов

Параметры	Тип динистора							
	Д227А	Д227Б	Д227В	Д227Г	Д227Д	Д227Е	Д227Ж	Д227И
Максимальное обратное напряжение $U_{обр.макс}$, *в*	10	10	10	10	10	10	10	10
Остаточное напряжение $U_{ост}$ (не более), *в*	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Напряжение переключения $U_{вкл}$, *в*	10—20	14—28	20—40	28—56	40—80	56—112	80—160	100—200
Ток переключения $I_{вкл}$ (не более), *ма*	5	5	5	5	5	5	5	5
Ток выключения $I_{выкл}$ (не более), *ма*	15	15	15	15	15	15	15	15
Ток утечки $I_{ут}$ (не более), *мка*	100	100	100	100	100	100	100	100
Обратный ток $I_{обр}$ (не более), *ма*	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Максимальный постоянный ток $I_{макс}$, *ма*	200	200	200	200	200	200	200	200
Максимальный импульсный ток $I_и$, *а**:								
при длительности импульса $\tau_и \leqslant 10$ *мсек*	2	2	2	2	2	2	2	2
при длительности импульса $\tau_и \leqslant 10$ *мксек*	10	10	10	10	10	10	10	10
Время включения $\tau_{вкл}$ (не более), *мксек*	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Время выключения $\tau_{выкл}$ (не более), *мксек*	10	10	10	10	10	10	10	10
Емкость диода $C_д$ (не более), *пф*	100	100	100	100	100	100	100	100
Максимальная температура корпуса $t_к$, °C	+100	+100	+100	+100	+100	+100	+100	+100

* При среднем токе через прибор не более 20 *ма*. При длительности импульса $\tau_и = 10$ *мксек* ÷ 10 *мсек* значение максимального импульсного тока определяется по формуле $I = 12{,}7 - 2{,}7 \lg \tau_и$, где ток I — в амперах, $\tau_и$ — в микросекундах.

Примечание Величины $U_{ост}$, $I_{вкл}$, $I_{выкл}$, $I_{ут}$, $I_{обр}$, $\tau_{вкл}$, $\tau_{выкл}$, $C_д$ приведены в интервале рабочих температур.

жение переключения $U_{вкл}$. Для динисторов, у которых $U_{пр}<U_{вкл}$, рабочей является только прямая ветвь вольт-амперной характеристики.

Наиболее важным параметром динистора является величина напряжения включения среднего *p-n* перехода $U_{вкл}$ и ток удержания $I_{выкл}$. Для различных типов динисторов значение величины $U_{вкл}$ лежит в пределах 25—500 *в*, а значения токов $I_{выкл}$ колеблются в пределах от нескольких десятков микроампер до нескольких десятков миллиампер.

Характеристики динисторов, как и других полупроводниковых приборов, существенно зависят от температуры. С повышением температуры величины $U_{вкл}$, $I_{вкл}$ и $I_{выкл}$ уменьшаются. При этом параметры более мощных приборов (Д227) имеют повышенную нестабильность по сравнению с менее мощными (Д228). Параметры выпускаемых отечественной промышленностью динисторов Д227 и Д228 приведены в табл. 3 и 4. Снижение напряжения включения при повышении температуры обусловливается увеличением тока утечки центрального перехода и коэффициентов усиления α_1 и α_2 эквивалентных транзисторов *p-n-p* и *n-p-n*, составляющих динистор. Увеличение α_1 и α_2 вызывает также снижение токов $I_{вкл}$ и $I_{выкл}$.

Применение динисторов

Принципы управления. Как уже указывалось, динисторы являются двухпозиционными переключателями. В большинстве устройств на динисторах напряжение питания *E* должно быть меньше напряжения включения. В таких случаях величина *E* выбирается таким образом, чтобы схема была достаточно чувствительной и обеспечивалась устойчивость исходного состояния при небольшом токе утечки. Компромиссная величина $E=U_{вкл.мин}/2$. Именно для нее в паспорте указан допустимый ток утечки ($U_{вкл.мин}$ — минимальная величина $U_{вкл}$). Паспортная величина $U_{вкл}$ является статическим параметром динистора, т. е. измеренным на постоянном токе. При включении динисторов с помощью импульсов напряжения с достаточно крутыми фронтами величина $U_{вкл}$ может существенно снизиться.

Способы включения динисторов управляющими импульсами показаны на рис. 31. В этих схемах для повышения входного сопротивления используются обычные диоды. Входной импульс смещает их в обратном направлении. Иногда для включения динисторов применяют повышающие импульсные трансформаторы (рис. 31,*в* и *г*). При включении динистора по схеме, приведенной на рис. 31,*в*, прохождению анодного тока через вторичную обмотку трансформатора препятствует диод $Д_1$. В схеме на рис. 31,*г* для этого же используют резистор R_1.

В схеме рис. 31,*д*, которая может включаться импульсами разной полярности, роль диода, повышающего входное сопротивление, выполняет один из динисторов. Амплитуда напряжения на выходе этой схемы выше по сравнению с остальными. Резисторы R_1 и R_2 делят напряжение на динисторах на равные части. Их сопротивления, очевидно, должны быть достаточно большими (порядка 100 *ком*).

Автогенераторы. Простейшая схема релаксационного генератора на динисторе изображена на рис. 32,*а*. Для обеспечения работы схемы необходимо, чтобы напряжение источника *E* было больше напряжения включения динистора. В исходном состоянии динистор

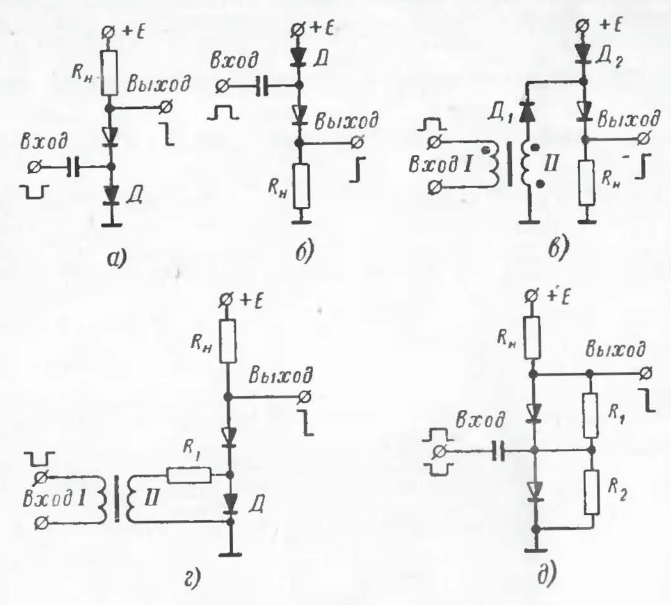


Рис. 31. Схемы включения динисторов.

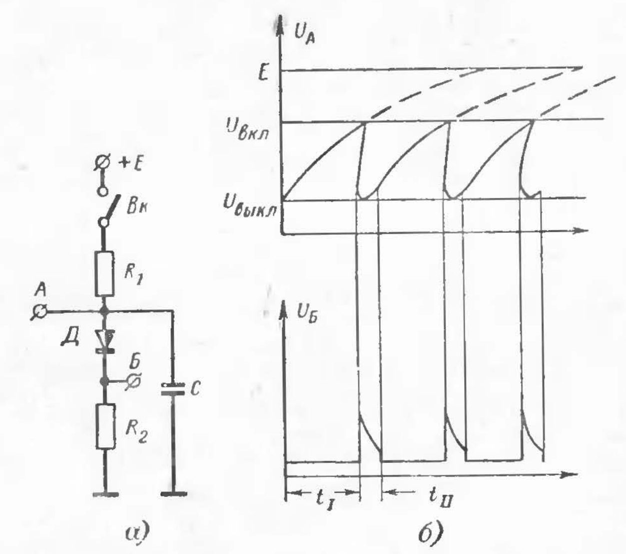


Рис. 32. Релаксационный генератор

заперт, и конденсатор C заряжается от источника э. д. с. Когда напряжение на динисторе достигает величины, равной напряжению включения, конденсатор разряжается через динистор и ограничительное сопротивление R_2. Разряд конденсатора продолжается до тех пор, пока ток, протекающий через динистор, не станет меньше тока выключения. При этом динистор снова вернется в запертое состояние. Временные диаграммы напряжений показаны на рис. 32,*б*.

Автоколебательный режим возможен, если нагрузочная прямая пересекает вольт-амперную характеристику динистора в одной точке на участке отрицательного сопротивления.

На рис. 33,*а* приведена схема мультивибратора на двух динисторах. Мультивибратор генерирует импульсы, сдвинутые во времени. Процесс заряда конденсаторов в этой схеме ускорен по сравнению с мультивибратором на одном динисторе. Предположим, что после подачи напряжения, питания первым включается динистор $Д_2$. Вследствие того, что низкоомная цепь—динистор $Д_2$, диод $Д$, резистор R_2— шунтирует большое сопротивление R_1, через которое заряжается конденсатор C_1, скорость нарастания напряжения на динисторе $Д_1$ увеличивается.

Параметры схемы подобраны таким образом, чтобы динистор $Д_2$ выключался прежде, чем включится динистор $Д_1$. При включении динистора $Д_1$ цепь — $Д_1$, R_2, $Д$ — шунтирует большое сопротивление R_3, через которое заряжается конденсатор C_2, что ускоряет нарастание напряжения на динисторе $Д_2$. После выключения динистора $Д_1$ и включения динистора $Д_2$ процессы повторяются.

Схема, показанная на рис. 33,*б*, работает следующим образом. При включении одного из динисторов, например $Д_1$, другой смещается в обратном направлении коммутирующим конденсатором C и выключается. Далее емкость перезаряжается вплоть до момента, когда напряжение на динисторе $Д_2$ достигает величины, достаточной для его включения. При включении динистора $Д_2$ импульс конденсатора C выключает динистор $Д_1$.

Рассмотренные схемы мультивибраторов могут применяться в качестве генераторов пилообразного напряжения. Однако для достижения удовлетворительной линейности фронтов импульсов необходимо использовать лишь начальный участок экспоненциально изменяющегося напряжения, где кривизна весьма невелика. В таких схемах э. д. с. источника питания должна в десятки раз превосходить напряжение включения динисторов. Применение высоковольтных источников не всегда осуществимо и связано с рядом затруднений.

Если емкость в схеме мультивибратора заряжать от генератора тока, то хорошая линейность получается даже тогда, когда э. д. с. источника незначительно превышает напряжение включения динистора. Схема автогенератора такого рода показана на рис. 33,*в*. В ней в первую часть периода динистор выключен, и конденсатор заряжается коллекторным током транзистора. Так как ток коллектора не изменяется, напряжение на конденсаторе растет во время заряда по линейному закону. Напряжение на динисторе в это время также увеличивается. После включения динистора следует экспоненциальный разряд конденсатора. В это время ток, протекающий через динистор, убывает. После выключения динистора конденсатор заряжается снова.

Мультивибратор, выполненный на двух динисторах и двух транзисторах (рис. 33,*г*), генерирует симметричные импульсы. Такая схема синтезирована на основе двух более простых. Мультивибратор,

изображенный на рис. 33,*д*, позволяет получать выходные сигналы ступенчатой формы. Левое «плечо» схемы (на динисторе $Д_1$) принципиально не отличается от простейшего автогенератора (см. рис. 32,*а*). При периодическом включении динистора $Д_1$, работающего в автоколебательном режиме, транзистор T отпирается отрица-

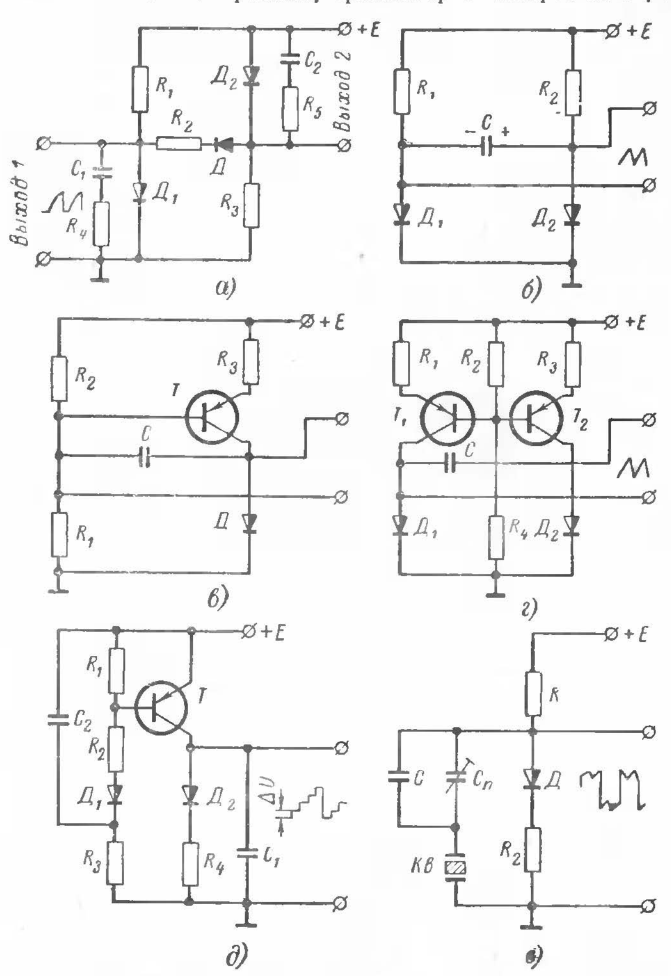


Рис. 33. Схемы мультивибраторов.

тельным сигналом и выходное напряжение возрастает ступенями на величину ΔU.

Емкость C_1 является интегрирующим элементом. Когда напряжение U_{C1} достигает величины, достаточной для включения динистора $Д_2$, выходное напряжение падает и емкость C_1 разряжается через

динистор $Д_2$ вплоть до его выключения. Далее процесс повторяется. Динисторы могут использоваться в генераторах эталонной частоты.

Одна из схем генератора с кварцевым элементом *Кв* показана на рис. 33,*е*. Здесь $C_п$ — керамический подстроечный конденсатор—триммер. В приведенной схеме частота определяется кварцевым элементом, причем относительное отклонение выходной частоты Δf не превышает значений, характерных для схем, в которых используются транзисторы.

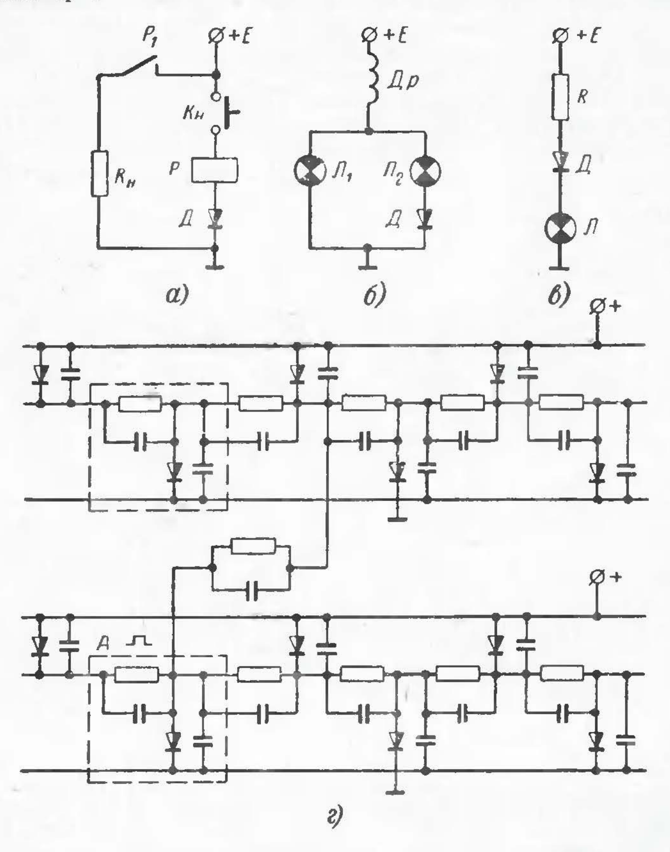


Рис. 34. Устройства защиты и модель нейристора.

Устройства защиты. Свойство динисторов включаться при определенном напряжении позволяет использоваться их для автоматического переключения электрических цепей, когда уровень напряжения превышает заданную величину.

На рис. 34,*а* показана схема автоматического отключения нагрузочного сопротивления от источника питания. В исходном состоянии кнопка *Кн* замкнута. Смещение динистора не превосходит напряжения включения $U_{вкл}$. Реле *Р* нормально замкнуто, и через резистор

$R_н$ протекает нагрузочный ток. При $E \geqslant U_{вкл}$ динистор включается, вызывая срабатывание реле. Для того чтобы вернуть схему в исходное состояние, размыкается и затем вновь замыкается кнопка *Кн*.

Схема, изображенная на рис. 34,*б*, используется для включения резервного светового индикатора при выходе из строя основного. Если перегорает лампочка $Л_1$, э. д. с. самоиндукции, возникающая в дросселе *Др*, включает динистор и вместе с ним резервную лампочку $Л_2$.

Схема, изображенная на рис. 34,*в*, используется как термореле. В исходном состоянии динистор выключен. При повышении температуры выше критической напряжение включения динистора $U_{вкл}$ снижается и э. д. с. источника оказывается достаточной для его включения. Термореле на динисторе имеет низкую «разрешающую способность» и может быть использовано только там, где не требуется точной фиксации температуры. Однако по сравнению с механическими температурными датчиками это реле обладает, по крайней мере, одним несомненным достоинством — оно не имеет контактов.

В схемах, показанных на рис. 34,*а—в*, динисторы работают в бистабильном режиме.

Нейристоры. Интересным примером использования динисторов в области бионики является моделирование ячейки нервной ткани— нейрона. Известная модель нейрона (так называемый нейристор), разработанная в США, построена на транзисторах. Основной частью транзисторной модели нейрона являются одновибраторы, собранные на двух транзисторах.

Принцип построения модели нейронов, выполненной на динисторах, показан на рис. 34,*г*. Каждая цепочка (обведена штриховой линией) составлена из однотипных одновибраторных ячеек, основными элементами которых являются динисторы. Если в точку *А* подать положительный сигнал, то «возбуждение» (последовательное переключение ячеек) будет распространяться в обе стороны от места запуска. Область применения нейристоров — кибернетические машины, предназначенные для обработки информации.

459—1

Глава четвертая

ТИРИСТОРЫ

Общие замечания

Появившиеся в 1957—1958 гг. тиристоры нашли широкое применение в самых различных отраслях радиоэлектроники и электротехники, причем интерес к ним продолжает расти. Тиристоры заменяют во многих схемах тиратроны, реле, магнитные усилители и катушки с насыщающимися сердечниками, контакторы, регулируемые автотрансформаторы, плавкие предохранители, реле времени, электронные лампы, мощные полупроводниковые приборы. Особенно большое значение появление и развитие тиристоров имеет для регулируемого электропривода постоянного и переменного тока. Значение тиристоров для народного хозяйства станет понятным, если обратиться к одному из примеров использования тиристоров в преобразователях переменного тока в постоянный. Около 20% всей электроэнергии потребляется у нас в стране в виде постоянного тока. Преобразование переменного тока в постоянный обычными способами с помощью ртутных выпрямителей и электрических машин связано с большими потерями энергии (от 10 до 30%). Тиристоры обладают очень высо-

ким к. п. д. Энергетические потери в них не превышают 1%. В масштабе нашей страны уменьшение потерь энергии всего на 1% равносильно созданию электростанции, мощность которой равна мощности Куйбышевской ГЭС.

Кроме того, следует учесть, что тиристоры изготовляются и на весьма малые токи. Это позволяет строить на их основе различные импульсные устройства, логические элементы, весьма совершенные схемы управления различными объектами, в том числе, например, преобразователи на мощных тиристорах. В конструктивном отношении тиристоры подобны динисторам, рассмотренным в предыдущей главе, и являются их дальнейшим развитием.

Конструкция и принцип действия

Тиристор выполнен на основе четырехслойной *p-n-p-n* структуры с дополнительным выводом от одной из базовых областей (рис. 35). Этот вывод служит управляющим электродом прибора. В предыдущей главе было показано, что *p-n-p-n* структуры переключаются

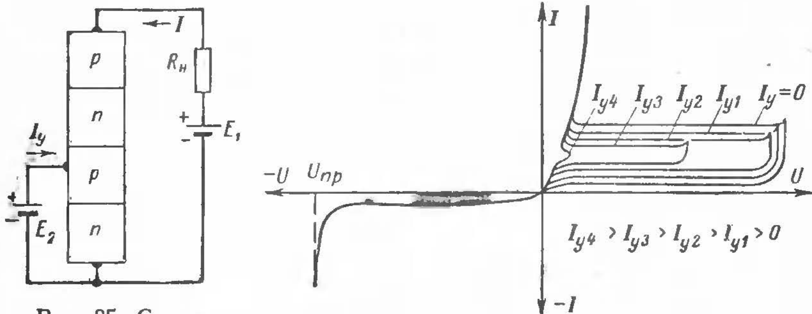


Рис. 35. Структурная схема тиристора.

Рис. 36. Вольт-амперные характеристики тиристора при различных токах управления.

в проводящее состояние, при выполнении условия $\alpha_1+\alpha_2=1$. Переключение в основном обусловлено зависимостью этих коэффициентов усиления от тока. Таким образом, управляя током, протекающим через один из эмиттерных переходов, можно переключать прибор в проводящее состояние почти независимо от величины приложенного к структуре напряжения.

Типичные вольт-амперные характеристики тиристора при различных значениях тока управляющего электрода приведены на рис. 36. При увеличении тока управляющего электрода напряжение переключения тиристора снижается. При достаточно большом управляющем токе $I_у$ вольт-амперная характеристика прибора становится такой же, как у обычного диода.

Управляющий электрод служит только для отпирания тиристора. После того, как тиристор переходит в проводящее состояние, управляющий электрод перестает управлять прибором. Для того чтобы переключить прибор в запертое состояние, нужно снизить прямой ток до величины, меньшей тока выключения $I_{выкл}$ (см. рис. 30), или подать ток управления $I_у=I_{выкл}$, но в направлении, обратном включению.

Параметры отечественных тиристоров приведены в табл. 5.

Таблица 5

Параметр	Тип диода			
	Д235 (А — Г)	Д238 (А—Е)	УПВК	ВКДУ
Напряжение переключения (не менее), *в*	40—100	50—150	150—1 500 (при 20° С)	50—700
Остаточное напряжение при $t=25°$ С (не более), *в*	2	2	0,5—0,8	0,9—1,25
Обратное напряжение (не менее), *в*	40—50	50—150	100—1 200 (амплитуда при 120° С)	50—700
Ток управления (не более), *ма*, в интервале температур	20—50 (+25 ÷ —60° С)	150 (при—50° С)	150	1 000 (амплитуда)
Максимальный ток во включенном состоянии, *а*	2	10	50—100	50—200
Время включения, *мксек* (не более)	5	10	2—5	10
Время выключения, *мксек* (не более)	35	35	15—20	25

Зависимость параметров от температуры

Знание температурной зависимости параметров вольт-амперной характеристики необходимо для правильного применения тиристоров. Температурная зависимость вольт-амперной характеристики тиристора определяется в основном изменением α и $I_{к0}$ от температуры.

Обратные токи кремниевых *p-n* переходов при увеличении температуры растут. В интервале от +20 до +120° С эти токи могут увеличиваться в 100 раз. Надежных теоретических соотношений для зависимости $I_{к0}$ от температуры нет, так как обратный ток часто определяется такими факторами, как утечкой по поверхности, различными неоднородностями в переходе и т. п. При отрицательных температурах $I_{к0}$ уменьшается.

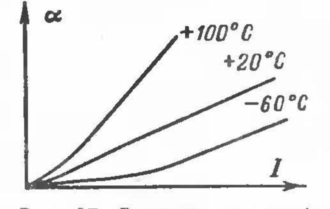


Рис. 37. Зависимость коэффициента усиления по току от температуры.

Коэффициенты усиления по току при увеличении температуры возрастают (рис. 37). Напряжение лавинного пробоя *p-n* перехода $U_{пр}$ при увеличении температуры возрастает, а при отрицательных температурах уменьшается. Ниже будет рассмотрено, как отмеченные выше факторы влияют на параметры тиристора.

Максимальное напряжение переключения $U_{вкл}$ при повышении температуры обычно уменьшается. Это связано с увеличением обратного тока центрального перехода $I_{к0}$ и коэффициента усиления по току α, что приводит к увеличению тока через прибор и еще большему росту α. Однако ряд приборов обнаруживает рост $U_{вкл}$ при нагревании, что, по-видимому, связано с увеличением напряжения лавинного пробоя центрального перехода $U_{пр}$, если коэффициенты усиле-

ния тиристорных переходов α_1 и α_2 (см. рис. 29) прибора малы. Ток утечки $I_{ут}$ у выключенного прибора на прямой и обратной ветвях вольт-амперной характеристики с ростом температуры возрастает. Ток выключения увеличивается при понижении температуры и уменьшается при нагревании. Падение напряжения на включенном приборе ΔU при нагревании уменьшается. Необходимый для отпирания ток $I_у$ при нагревании уменьшается, а при охлаждении растет.

Емкость

Емкость тиристора при нулевом смещении представляет собой емкость трех последовательно включенных *p-n* переходов (рис. 38,*а*). При приложении напряжения любой полярности емкость прибора уменьшается (рис. 38,*б*).

При положительном смещении между анодом и катодом крайние *p-n* переходы имеют прямое смещение и емкость прибора определяется емкостью обратно смещенного центрального *p-n* перехода.

При обратном смещении емкость прибора равна емкости двух последовательно включенных переходов j_1 и j_3.

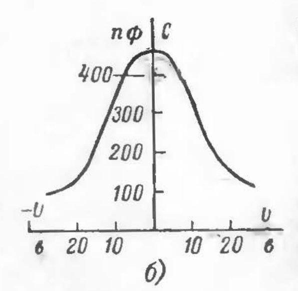


Рис. 38. Емкость тиристора и ее зависимость от приложенного напряжения.

Время отпирания и запирания

От момента подачи управляющего импульса до значительного повышения тока на нагрузке обычно проходит некоторое время, называемое *временем задержки*. Оно отсчитывается от переднего фронта отпирающего импульса до момента нарастания анодного тока на 10% от установившегося значения. Время задержки $t_з$ уменьшается с увеличением отпирающего импульса. Время нарастания $t_н$ определяется как интервал времени, необходимый для возрастания анодного тока от 10 до 90% от установившегося значения. Время нарастания зависит от характера нагрузки и в меньшей степени от начальной величины анодного напряжения. Для безиндуктивных цепей, где скорость нарастания тока в анодной цепи зависит только от собственных свойств тиристора, время нарастания обычно уменьшается с увеличением напряжения или понижением тока нагрузки.

Время нарастания и время задержки повышаются с ростом температуры. Например, полное время переключения $(t_з+t_н)$ при изменении температуры перехода от 25 до 100° C может изменяться на 20—30%.

Включение тиристора осуществлиется путем подачи положительного сигнала между управляющим электродом и катодом (при условии, что выделение мощности в цепи управляющего электрода не будет превышать допустимой величины). В случае использования импульсного источника отпирающих импульсов амплитуда импульсов

и длительность должны быть достаточными для надежного отпирания тиристора.

Запирание тиристора осуществляется либо путем снижения тока через него до значения меньшего $I_{выкл}$, либо путем подачи на анод отрицательного по отношению к катоду напряжения.

Схемы, работающие от источника питания постоянного тока, принципиально отличаются от схем, работающих от источников переменного тока. При работе на переменном токе запирание тиристора осуществляется самой питающей сетью в течение отрицательного полупериода, в то время как при питании от источника постоянного тока требуется специальная цепь отключения, которая, как правило, содержит конденсатор для накопления энергии, необходимой для запирания. Время восстановления $t_{восст}$, необходимое для запирания тиристора, является функцией следующих факторов:

1) температуры перехода $T_п$ ($t_{восст}$ увеличивается с увеличением $T_п$);

2) величины прямого тока непосредственно перед отключением и скорости спадания тока ($t_{восст}$ увеличивается с увеличением $I_п$ и скорости спадания тока). Зависимость времени восстановления от скорости спадания прямого тока обусловливается влиянием этого фактора на величину заряда, накопленного в приборе к моменту приложения обратного напряжения. Быстрое спадание прямого тока приводит к увеличению накопленного заряда, что в свою очередь приводит к увеличению времени восстановления. Если спадание прямого тока будет происходить со скоростью меньшей, чем скорость, с которой накопленный заряд достигает естественным путем равновесного состояния, то величина прямого тока не будет оказывать влияния на время восстановления;

3) обратного напряжения и скорости его нарастания ($t_{восст}$ уменьшается с увеличением $U_{обр}$ и скорости его нарастания);

4) амплитуды и скорости нарастания прямого напряжения, прикладываемого после обратного напряжения ($t_{восст}$ увеличивается с увеличением восстанавливающегося прямого напряжения и скорости его нарастания);

5) напряжения на управляющем электроде.

Отрицательное напряжение между управляющим электродом и катодом повышает также способность тиристора выдерживать скорость нарастания восстанавливающегося прямого напряжения больше допустимой (20 *в/мксек*).

Способы запирания

Существуют многочисленные схемы, которые могут быть использованы для выключения тиристора. Прерывание тока нагрузки выключателем (рис. 39,*а*) может быть осуществлено, если выключатель будет разомкнут в течение времени $\geqslant$100 *мксек*.

На рис. 39,*б* и *в* отключение осуществляется за счет шунтирования тиристора. В полупроводниковом триоде на рис. 39,*б* падение напряжения между эмиттером и коллектором (при прохождении полного тока нагрузки) должно быть меньше прямого падения напряжения в тиристоре, так как в противном случае через тиристор будет проходить некоторая доля тока нагрузки и он не сможет отключиться. Использование тиристора для пропускания рабочего тока и реле для выключения вентиля (рис. 39,*в*) целесообразно в тех случаях, когда необходимо обеспечить надежное прохождение тока в цепи при ударах и вибрациях, которые могут привести к отскакиванию

контактов реле. Способы запирания тиристора, показанные на рис. 39,*б* и *в*, допускают прохождение через него некоторого обратного тока, зависящего от того, насколько малы шунтирующее напряжение и сопротивление шунтирующей цепи. Эти способы отключения часто дают лучший результат, чем способ на рис. 39,*а*.

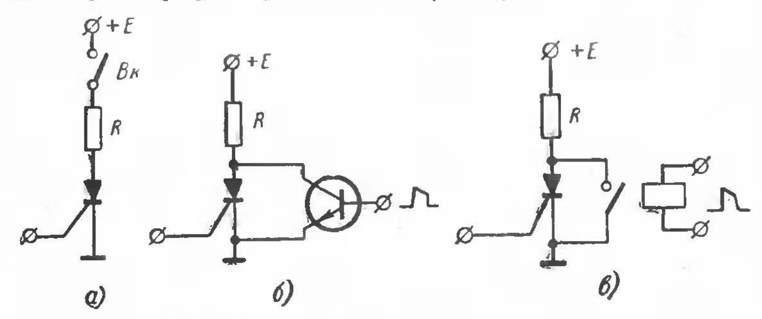


Рис. 39. Схемы выключения тиристоров.
а — с помощью выключателя; *б* — шунтирование тиристора триодом; *в* — шунтирование тиристора контактами реле.

Если к тиристору приложено синусоидальное напряжение, то он может быть открыт во время положительного полупериода и заперт в течение отрицательного полупериода. В начале отрицательного полупериода в течение нескольких микросекунд ток через прибор будет проходить в обратном направлении. Выключение тиристора во всех

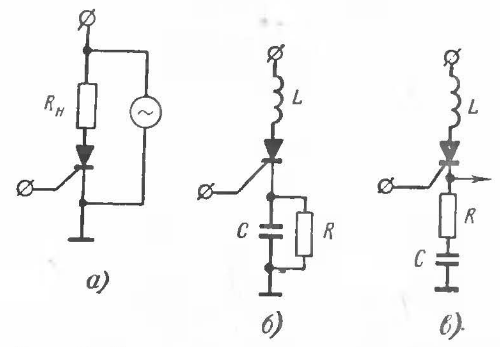


Рис. 40. Схемы выключения тиристоров за счет отрицательных полуволн переменного напряжения.

схемах, указанных на рис. 40, осуществляется по такому принципу. Схема на рис. 40,*а* соответствует питанию от источника переменного тока. В схемах на рис. 40,*б* и *в* при отпирании тиристора возникает режим затухающих колебаний; прибор запирается, когда ток изменяет свое направление на обратное. В момент изменения направления тока напряжение на конденсаторе будет выше напряжения питания, поэтому к тиристору будет приложено обратное смещение.

Обычный способ запирания тиристора сводится к подключению на зажимы тиристора заряженного конденсатора так, чтобы катод получил положительный потенциал относительно анода. Заряжен-

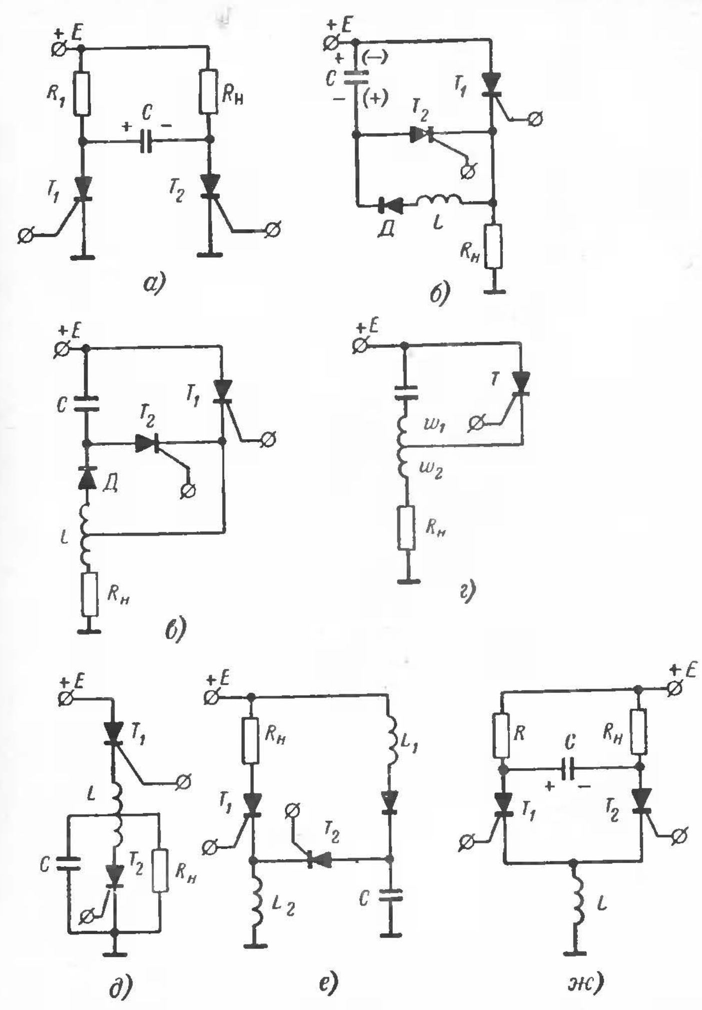


Рис. 41. Выключение тиристоров за счет заряда-разряда конденсаторов.

ный конденсатор представляет собой источник отрицательного напряжения с очень низким сопротивлением, что дает возможность прохождения достаточно большого обратного тока и выключения вентиля в кратчайшее время.

На рис. 41 показаны различные способы зарядки конденсатора до необходимого напряжения и его последующего подключения к зажимам тиристора для обеспечения запирания последнего.

На рис. 41,*а*, когда тиристор T_2 открыт, конденсатор C заряжается через резистор R_1 (полярность указана на рисунке). При отпирании тиристора T_1 левая обкладка конденсатора соединится с землей, вследствие чего напряжение на аноде тиристора T_2 мгновенно станет ниже потенциала земли на величину E. Если постоянная времени R_2C будет достаточно большой, то на тиристоре T_2 будет сохраняться обратное напряжение в течение времени, необходимого для его запирания.

В схеме, показанной на рис. 41,*б*, до того, как будет включен тиристор T_1, необходимо включить тиристор T_2. Тогда нижняя обкладка конденсатора C получит потенциал, примерно равный потенциалу земли. Затем при включении тиристора T_1 к резистору $R_н$ будет приложено все напряжение питания, и конденсатор C перезарядится через дроссель L и диод $Д$. (Полярность обкладок конденсатора в этом случае показана в скобках.) Теперь, когда тиристор T_2 снова будет отперт, напряжение на катоде тиристора T_1 повысится до $2E$ и он отключится за счет приложения к нему обратного напряжения, примерно равного E.

Принцип действия схемы, приведенной на рис. 41,*в*, аналогичен принципу действия схемы, изображенной на рис. 41,*б*, за исключением того, что в этой схеме катушка индуктивности L включена как автотрансформатор, в связи с чем нижняя обкладка конденсатора C заряжается до напряжения, превышающего при больших токах нагрузки более чем в 2 раза напряжение питания. За счет этого энергия, накопленная в конденсаторе, возрастет; запирание тиристора будет происходить при больших токах нагрузки; в результате время его восстановления удлиняется.

В схеме, приведенной на рис 41,*г*, называемой также схемой Моргана, используется насыщающийся дроссель, действующий одновременно как автотрансформатор и как выключатель. Когда тиристор T открывается, к зажимам w_2 прикладывается полное напряжение питания, которое насыщает сердечник и заряжает нижнюю обкладку конденсатора C до напряжения питания. Ток нагрузки, проходящий через w_1, изменяет направление намагничивающей силы в сердечнике и доводит напряжение на конденсаторе C, вследствие автотрансформаторного действия, до напряжения выше, чем E. Через некоторое время ток нагрузки снова насыщает сердечник (однако в противоположном направлении), и заряженный конденсатор оказывается подключенным к зажимам тиристора T. В результате вентиль запирается.

Если сопротивление нагрузки на рис. 41,*д* достаточно мало, контур RLC будет иметь большое затухание и колебаний в нем происходить не будет. Когда тиристор T_1 отперт, конденсатор C заряжается до напряжения питания. При выключении тиристора T_2 напряжение на катоде тиристора T_1 станет выше, чем E (в результате автотрансформаторного действия), и он запретсяю.

На рис. 41,*е* конденсатор заряжается через катушку L_1 с индуктивностью порядка 1 *мгн* до напряжения, равного примерно $2E$. Катушка L_2 имеет малую индуктивность (50 *мкгн*), поэтому, когда тиристор T_1 включен, ток через $R_н$ быстро нарастает. При отпирании тиристора T_2 конденсатор C разряжается через L_2 и на катоде тиристора T_1 появляется положительное напряжение, выше напряжения питания, что приводит к его запиранию. Тиристор T_2 запирается, когда ток в контуре T_2L_2C изменяет свое напряжение. Эту схему необходимо рассчитать таким образом, чтобы конденсатор C разряжался всегда до напряжения отпирания тиристора T_1.

Схема на рис. 41,*ж* подобна схеме, приведенной на рис. 41,*а*. В ней лишь добавлен дроссель L, который помогает конденсатору запирать тиристоры. На зажимах дросселя возникают реактивные отключающие импульсы. В этой схеме конденсатор C может быть удален, если к дросселю L присоединить внешний генератор импульсов, обеспечивающий энергию коммутации.

Необходимо отметить, что тиристор T_2 во всех этих схемах может иметь, как правило, более низкий допустимый средний ток, чем тиристор T_1, так как он проводит ток только в течение нескольких микросекунд, необходимых для запирания тиристора T_1.

К коммутирующему конденсатору предъявляются весьма жесткие требования, поскольку в момент выключения тиристора через него в течение примерно 1 *мксек* проходит импульс обратного тока.

Коммутирующий конденсатор должен иметь достаточную поверхность фольги, малое сопротивление при высоких частотах, минимальные потери и обладать хорошими диэлектрическими свойствами в области высоких частот.

Применение тиристоров

Одной из основных областей применения тиристоров являются схемы коммутации для полного запирания или отпирания цепи. Ниже приведен ряд примеров применения тиристоров для создания статических переключателей.

Выключатель переменного тока. Схема на рис. 42 является идеальным вариантом бесконтактного выключателя. В ней нет механических контактов со свойственными им недостатками (прилипание, отскакивание и истирание контактов), что наблюдается обычно при работе электромеханических реле и контакторов. Управляющие устройства для такого статического выключателя могут срабатывать под действием света, тепла, напряжения, тока, давления, скорости, частоты, совпадения событий или фаз. В схемах такого типа для управления значительными мощностями могут быть использованы сигналы от магнитных датчиков, полупроводниковых триодов или электронных ламп. Резистор R предназначен для ограничения управляющего тока.

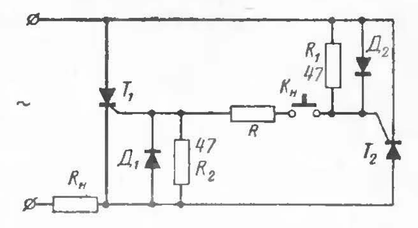


Рис. 42. Выключатель переменного тока.

Подобный выключатель переменного тока может быть применен в качестве сварочного контактора, для управления нагревательными печами, рентгеновскими установками, осветительными приборами, а также в качестве токоограничивающего выключателя. Использование таких статических выключателей вместо обычных реле в различных схемах управления снимает многие трудности, например, различие между током или напряжением срабатывания и возврата, поскольку тиристоры способны отключаться во время каждого полупериода. При условии правильного подбора сопротивления резисто-

ра R схема может работать в более широком диапазоне напряжений, чем обычное реле или контактор.

Выключатель переменного тока можно осуществить и с одним тиристором, для этого он включается между зажимами постоянного тока мостовой выпрямительной схемы, зажимы переменного тока которой включены последовательно с нагрузкой. Другие варианты схемы рис. 42 могут быть получены на базе обычных выпрямительных схем, что обеспечивает выполнение функций выключателя и выпрямителя при помощи одного устройства.

Выключатель постоянного тока. На рис. 43 дана схема статического выключателя постоянного тока. Когда к управляющему электроду тиристора T_1 приложен сигнал, тиристор отпирается и напряжение прикладывается к нагрузке. Правая обкладка конденсатора C заряжается положительно относительно левой через сопротивление резистора R_1. Когда включается тиристор T_2, конденсатор C оказывается подсоединенным между зажимами тиристора T_1 и к нему прикладывается обратное напряжение смещения. В результате тиристор T_1 выключается и прерывает ток нагрузки, при этом необходимо, чтобы управляющий сигнал не прикладывался одновременно к управляющим электродам обоих тиристоров.

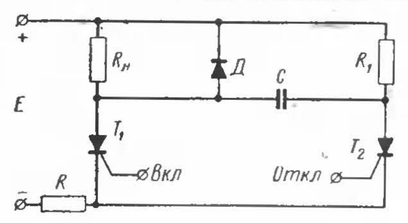


Рис. 43. Выключатель постоянного тока.

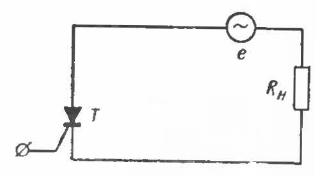


Рис. 44. Схема усилителя.

Тиристор T_1 подбирается с таким расчетом, чтобы максимальный ток нагрузки был меньше номинального тока, указанного в паспорте прибора. Поскольку тиристор T_2 открыт лишь во время процесса выключения, его средний допустимый ток может быть меньше, чем ток тиристора T_1. Минимальная коммутирующая емкость **C** (*мкф*) может быть определена по формулам:

для активной нагрузки

$$C \geqslant \frac{1,4 t_{\text{восст}} I}{E},$$

для индуктивной нагрузки

$$C \geqslant \frac{t_{\text{восст}} I}{E},$$

где $t_{\text{восст}}$ — время восстановления тиристора T_1, *мксек*;

I — максимальный ток нагрузки (включая возможные перегрузки) в момент коммутации, *а*;

E — минимальное питающее постоянное напряжение, *в*.

Сопротивление резистора R_1 должно быть в 10—100 раз меньше минимального сопротивления тиристора T_2 в запертом состоянии.

В некоторых случаях тиристор T_2 может быть заменен механическим переключателем, при кратковременном замыкании которого происходит запирание тиристора T_1.

Усилитель. Простейшая схема усилителя, состоящая из одного тиристора T, включенного последовательно с нагрузкой $R_н$ и источника питания переменного тока e, приведена на рис. 44. Отпирание тиристора осуществляется путем подачи соответствующего сигнала на управляющий электрод в положительный полупериод напряжения питания. Регулирование среднего значения тока нагрузки осуществляется изменением длительности включенного состояния тиристора, что обеспечивается изменением момента подачи сигнала управления в течение положительного полупериода источника питания.

Глава пятая

ЗАПИРАЕМЫЕ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ

Появление тиристоров позволило значительно упростить схемы для переключения мощности. Однако возможности тиристоров весьма ограничены, особенно при использовании их в цепях постоянного тока. Так, например, для выключения тиристора, т. е. перевода его из состояния проводимости в непроводящее состояние часто требуется сложная схема управления, надежность которой не всегда оказывается удовлетворительной. Кроме того, максимальная рабочая частота тиристора низка, так как при выключении он должен быть смещен в обратном направлении в течение относительно длительного периода времени (20—150 *мксек*), необходимого для восстановления прибора. Обратное смещение должно подаваться через внешнюю низкоомную цепь, в которой рассеивается значительная мощность.

Более удобен прибор, способный включаться и выключаться путем подачи сигнала на его управляющий электрод. Таким прибором является запираемый переключатель (*ЗП*). Подобно тиристору *ЗП* представляет собой четырехслойный переключающий прибор *p-n-p-n* типа с тремя электродами.

Основным преимуществом *ЗП* является возможность его включения и выключения с помощью сигнала, подаваемого на управляющий электрод, причем этот сигнал представляет собой маломощный импульс длительностью менее 10 *мксек*. Так же, как и тиристор, запираемый переключатель переводится в проводящее состояние с помощью положительного импульса, подаваемого на управляющий электрод. После включения запираемый переключатель остается в проводящем состоянии, независимо от наличия положительного импульса. Последующая подача на управляющий электрод отрицательного импульса возвращает переключатель в непроводящее состояние.

Такой механизм коммутации имеет явное преимущество по сравнению с механизмом коммутации мощного транзистора, нашедшего в настоящее время наибольшее распространение в переключающих схемах. В случае применения в качестве переключателя мощного транзистора для удержания его в проводящем состоянии необходимо непрерывно подавать управляющий сигнал, что приводит к значительному увеличению расходуемой мощности.

В процессе запирания, как и при включении, цепь между анодом и управляющим электродом *ЗП* обладает усилением по току.

В связи с этим в режиме коммутации постоянного тока запираемый переключатель превосходит тиристор по скорости запирания и суммарному быстродействию. Кроме того, *ЗП* меньше искажает форму выходного импульса. Последнее обусловлено тем, что токи, связанные с переходным процессом, вызванным переключением, в основном минуют цепи, пропускающие токи нагрузки.

Характеристики

Запираемый переключатель, подобно тиристору, переводится в проводящее состояние путем приложения положительного импульса между управляющим электродом и катодом. Для переключения *ЗП* обычно требуется больший управляющий ток, чем для тиристора, имеющего те же номинальные параметры. Бóльшую величину имеют также токи, удерживающие прибор во включенном и запертом состояниях. Кроме того, в проводящем состоянии рассеивается бóльшая мощность. У более мощных тиристоров и запираемых переключателей эти различия возрастают. Однако рассмотренные недостатки *ЗП*, по сравнению с тиристорами, полностью компенсируются возможностью запирания их по управляющему электроду.

Так как запираемые переключатели предназначены в первую очередь для коммутации цепей постоянного тока, в которых, как правило, на прибор действуют невысокие обратные напряжения, большинство запираемых переключателей рассчитаны на небольшое номинальное обратное напряжение (порядка 25—30 *в*). Если *ЗП* должен быть использован в схеме, где действуют высокие обратные напряжения, то последовательно с ним можно включить обычный кремниевый диод.

Запираемый переключатель является прибором, который управляется зарядом. Это значит, что для переключения прибора в проводящее состояние управляющий ток должен протекать в течение конечного промежутка времени. То же самое можно сказать и о запирающем токе. В любом случае на управляющем электроде должно действовать напряжение, которое вызывает протекание управляющего тока через внутреннее сопротивление запираемого переключателя.

Для запирания включенного *ЗП* из его управляющей цепи должен быть отведен заряд, накопленный при включении *ЗП* в проводящее состояние. Величина этого заряда может быть рассчитана, исходя из минимального коэффициента усиления в режиме запирания и длительности управляющего импульса, при которой этот коэффициент определен (коэффициент усиления в режиме запирания определяется как отношение запираемого анодного тока к отрицательному управляющему току, который необходим для обеспечения процесса запирания).

Коэффициент усиления зависит от многих факторов, основными из которых являются следующие.

Длительность управляющего импульса. При уменьшении длительности управляющего импульса в режиме запирания должна быть увеличена амплитуда управляющего импульса с тем, чтобы сохранить величину необходимого заряда.

Анодный ток. Коэффициент усиления прибора в режиме запирания зависит от величины запираемого анодного тока. При достижении анодным током значения удерживающего тока запирающий ток быстро уменьшается от бесконечно большой величины до некоторого

минимального значения, после чего при дальнейшем увеличении анодного тока возрастает пропорционально. При значении анодного тока, несколько большем предельного коммутируемого тока, коэффициент усиления в режиме запирания падает до нуля. Это явление обусловлено тем, что при больших токах электрод теряет способность контролировать катодную область запираемого переключателя, что характерно для всех *ЗП*. При попытках коммутировать токи, превышающие по величине предельное значение анодного тока, прибор может быть выведен из строя.

Температура перехода. Коэффициент усиления снижается при повышении температуры. Ввиду этого минимальный коэффициент усиления при запирании обычно определяется для предельной температуры перехода.

Время нарастания и спада управляющего импульса. Малое время нарастания отрицательного управляющего импульса улучшает условия запирания. При слишком же быстром спаде импульса коэффициент усиления в режиме запирания может снизиться. И то, и другое связано с емкостью между управляющим электродом и катодом. Аналогичное явление наблюдается при включении (отпирании) запираемого переключателя. В этом случае включающий импульс с малым временем нарастания ускоряет отпирание, а быстрый спад импульса может способствовать последующему запиранию. В процессе включения этот эффект проявляется в снижении чувствительности прибора к включающему сигналу, подаваемому на управляющий электрод, и повышении анодного тока, удерживающего прибор в отпертом состоянии.

Методы запирания

Наибольшее распространение получили три способа управления запираемыми переключателями: с помощью заряда и разряда конденсатора, включенного последовательно с управляющим электродом; за счет прерывания постоянного тока через катушку индуктивности, включенную между управляющим электродом и катодом; путем коммутации нагрузки в катодной цепи.

Рассмотрим эти способы более подробно.

Запирание с помощью последовательного конденсатора. Запираемый переключатель можно включать и выключать, поочередно заряжая и разряжая конденсатор, включенный последовательно в цепь управляющего электрода. Такая схема управления запираемым переключателем приведена на рис. 45,*а*. Схема работает следующим образом. Когда выключатель *Вк* разомкнут, конденсатор C_1 заряжается до напряжения E_1 через резистор R_1 и внутреннее сопротивление управляющей цепи. Для надежного переключения запираемого переключателя должны выполняться следующие неравенства:

$$R_1 \leqslant \frac{E_1 - U_у}{3I_у} \quad (1)$$

$$C \geqslant \frac{t_1}{\left(R_1 + \frac{U_у}{I_у}\right)}, \quad (2)$$

где $U_у$ — максимальное включающее напряжение на управляющем электроде;
$I_у$ — максимальный включающий ток в управляющей цепи;
t_1 — длительность управляющего импульса.

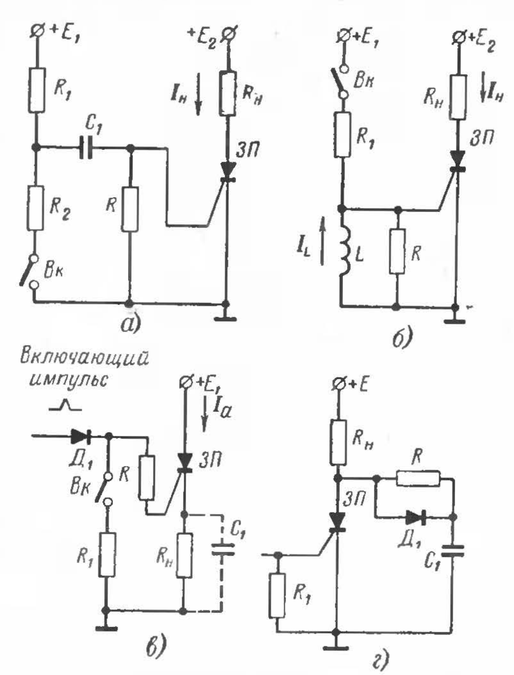


Рис. 45. Выключение запираемых переключателей.

а — с помощью последовательного конденсатора; *б* — с помощью параллельной катушки индуктивности; *в* — коммутацией нагрузки в катодной цепи; *г* — с помощью специальной схемы запирания.

Если выключатель *Вк* замкнут, то конденсатор C_1 разряжается через резистор R_2 и внутреннее сопротивление управляющей цепи *ЗП*. В этом случае параметры схемы определяются из неравенства

$$R_2 \leqslant \frac{E_1 - U_з}{2I_з} \tag{3}$$

и

$$C_1 \geqslant \frac{t_2}{R_2 + \frac{U_з}{I_з}}, \tag{4}$$

где $U_з$ — максимальное запирающее напряжение на управляющем электроде;
$I_з$ — максимальный запирающий ток в управляющей цепи;
t_2 — длительность запирающего импульса.

Неравенством (3) определяется только максимальное сопротивление резистора R_2, гарантирующее выполнение переключения. В большинстве схем для ускорения запирания сопротивление резистора R_2 берется много меньше расчетного. Нижний предел сопротивления определяется или допустимой мощностью для управляющей цепи запираемого переключателя в импульсе при протекании обратного тока, или каким-либо другим схемным ограничением, например, предельным током для выключателя *Вк*.

Запирание с помощью параллельной катушки индуктивности. Запираемый переключатель может быть выключен путем прерывания постоянного тока, протекающего через катушку индуктивности, концы которой присоединены к управляющему электроду и катоду. Такая схема управления *ЗП* приведена на рис. 45,*б*. Когда выключатель *Вк* замкнут, ток протекает через резистор R_1 и далее через управляющий электрод запираемого переключателя. Если управляющий ток ($U_у/R_1$) больше максимального управляющего тока $I_у$, *ЗП* будет включен.

Предположим, что внутреннее сопротивление управляющей цепи высокое по сравнению с сопротивлением катушки индуктивности L по постоянному току. Тогда в установившемся режиме $I_L = E_1/R_1$. Если теперь разомкнуть выключатель *Вк*, то ток I_L, протекавший через резистор R_1, потечет в управляющую цепь *ЗП* и последний выключится. Сопротивление резистора R_1 выбирается с таким расчетом, чтобы выключатель *Вк* пропускал максимальный запирающий ток I_L все время, пока находится в проводящем состоянии.

Коммутация нагрузки в катодной цепи. Выше рассмотрены две схемы управления *ЗП*, в которых сопротивление нагрузки включалось в анодную цепь. На рис. 45,*в* показана другая схема включения нагрузки — между катодом запираемого переключателя и землей. В этом случае включение *ЗП* и возбуждение нагрузки будет происходить при подаче на управляющий электрод короткого положительного импульса тока, поступающего через диод $Д_1$. Диод $Д_1$ имеет малое время восстановления (прямого и обратного сопротивлений) и служит для развязки источника включающего импульса от *ЗП*. Это необходимо в связи с тем, что потенциалы управляющего электрода и катода переключателя повышаются скачком до напряжения источника питания.

В рассматриваемой схеме *ЗП* может быть заперт путем замыкания выключателя *Вк*. При этом протекавший через управляющий электрод ток отводится на землю через токоограничивающий резистор R_1. Сопротивление R_1 выбирается с таким расчетом, чтобы при спаде напряжения и тока нагрузки в конце процесса запирания через управляющий электрод протекал достаточный для запирания ток. Сопротивление резистора R_1 должно удовлетворять соотношению

$$R_1 \geqslant R_н (K_1 - 1) - \frac{U_з - K_1}{I_a},$$

где I_a — максимальный анодный ток во время процесса переключения, равный $I_н \Big/ \left(1 - \frac{1}{K_1}\right)$;
K_1 — минимальный коэффициент усиления в процессе запирания;
$U_з$ — максимальная величина напряжения на управляющем электроде в процессе запирания.

Конденсатор C_1 шунтирует нагрузку. Он также способствует ускорению процесса запирания путем «поддержания» напряжения на нагрузке при спаде катодного тока. В схемах, где нагрузка представляет для переключающего импульса достаточно низкое сопротивление, конденсатор C_1 не нужен.

В отличие от рассмотренных ранее методов запирания, в схеме на рис. 45,*в* не используются реактивные коммутационные элементы, необходимые для накопления энергии. Поэтому такой схеме свойственно весьма высокое быстродействие. Основной недостаток рассмотренного метода заключается в том, что в период запирания анодный ток возрастает на величину, равную току через управляющий электрод и резистор R_1. Вследствие этого допустимый ток через катодную нагрузку должен быть уменьшен для того, чтобы полная величина максимального анодного тока *ЗП* не превосходила допустимую величину в течение периода запирания.

Специальные схемы запирания. В некоторых случаях оказывается возможным путем введения специальных схем, как это показано на рис. 45,*г*, коммутировать токи больше максимальных для данного прибора. Как только *ЗП* под действием отрицательного запирающего импульса начнет выключаться, часть анодного тока ответвляется для заряда конденсатора C_1. Величина этого тока зависит от емкости конденсатора C_1 и скорости нарастания анодного напряжения в процессе запирания. Такая схема дает возможность с помощью управляющего электрода коммутировать анодные токи, превышающие по величине допустимые для данного прибора. Однако это достигается за счет уменьшения скорости запирания тока в нагрузке. Резистор R в схеме на рис. 45,*г* служит для ограничения тока разряда конденсатора через *ЗП* в процессе включения. Диод $Д_1$ шунтирует резистор R в процессе запирания.

Некоторые области применения

Ниже рассмотрены шесть схем, в которых используются преимущества запираемых переключателей. Такими схемами являются: триггер, кольцевой счетчик, генератор пилообразного напряжения, стабилизированный преобразователь напряжения, высокочастотный прерыватель и генератор высоковольтных импульсов.

Триггер. Схема триггера с использованием ЗП приведена на рис. 46,*а*. Эта схема позволяет переключать ток с одной нагрузки на другую каждый раз, когда на общую входную шину поступает положительный переключающий импульс. Схема может работать до частот порядка 10 *кгц* и при надлежащем выборе компонентов обеспечивает напряжения и токи нагрузки, лежащие в довольно широком диапазоне.

Предположим, что запираемый переключатель $ЗП_1$ проводит ток нагрузки, а $ЗП_2$ находится в запертом состоянии. Конденсатор C_2 заряжается до уровня, соответствующего напряжению источника питания через нагрузочный резистор $R_{н2}$ и резистор R_4. Когда при действии следующего положительного импульса, проходящего через резистор R_6 и диод $Д_4$, происходит включение запираемого переключателя $ЗП_2$, на управляющий электрод $ЗП_1$ подается отрицательное напряжение от конденсатора C_2. В результате этого $ЗП_1$ оказывается выключенным. В свою очередь $ЗП_2$ аналогичным образом коммутируется конденсатором C_1 при включении $ЗП_1$. Такая триггерная схема может быть с успехом использована, например, в качестве генератора пусковых импульсов для тиристоров большой мощности, работающих в инверторах или в других схемах, где требуется значительная по величине импульсная мощность.

На рис. 46,*б* приведена другая схема триггера, которая может быть использована в качестве пусковой схемы с принудительной установкой триггера при первоначальной подаче напряжения питания. Здесь каждая из четырех выходных обмоток трансформаторов обеспечивает импульс тока амплитудой 1 *а* в нагрузочном резисторе сопротивлением 10 *ом*. Время нарастания импульса равно примерно 1 *мксек*, а длительность импульса около 20 *мксек*. Схема работает на частоте 10 *кгц*.

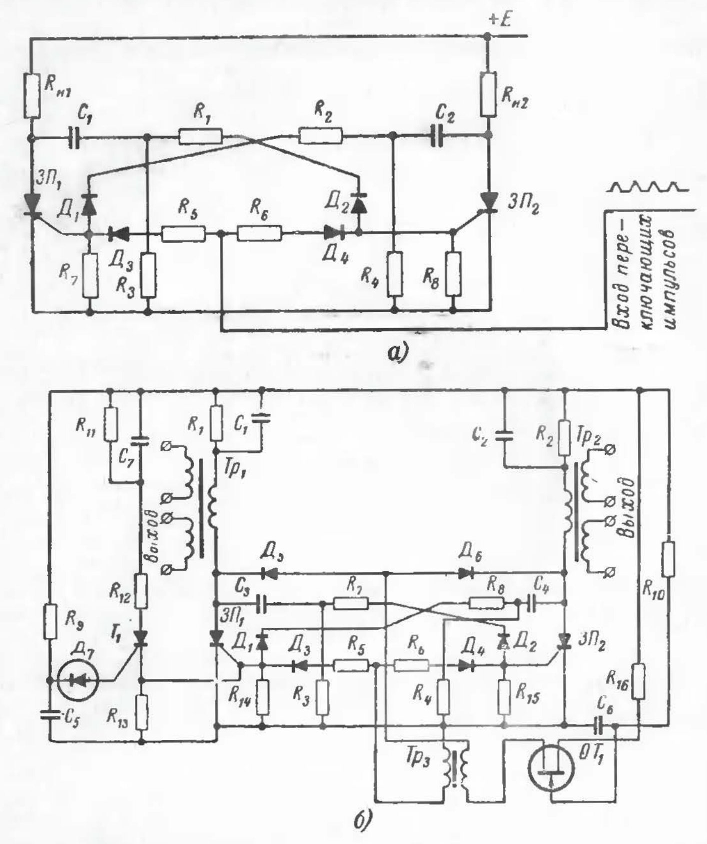


Рис. 46. Схемы триггеров.

При каждом включения однопереходного транзистора $ОТ_1$ запираемые переключатели меняют свое состояние. При включении $ЗП_1$ импульс тока проходит через первичную обмотку трансформатора $Тр_1$ и заряжает конденсатор C_1. Аналогично при включении $ЗП_2$ ток течет через первичную обмотку трансформатора $Тр_2$ и заряжает кон-

денсатор C_2. Эти импульсы появляются в виде выходных сигналов на вторичных обмотках трансформаторов. Механизм первоначальной принудительной установки схемы действует следующим образом. Когда впервые на схему подается напряжение питания, оба запираемых переключателя $ЗП_1$ и $ЗП_2$ находятся в выключенном состоянии. Диоды $Д_5$ и $Д_6$ смещены в обратном направлении и препятствуют протеканию межбазового тока через однопереходной транзистор $ОТ_1$, вследствие чего последний оказывается запертым. В то же время через резистор R_9 происходит заряд конденсатора C_5 до напряжения источника питания. Как только величина напряжения на конденсаторе C_5 превзойдет величину пробивного напряжения стабилитрона $Д_7$, произойдет включение тиристора T_1 и начнется зарядка конденсатора C_7. Ток, заряжающий конденсатор C_7, одновременно вклю-

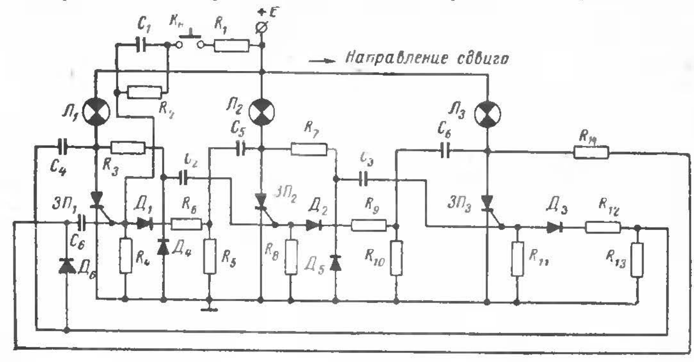


Рис. 47. Кольцевой счетчик.

чает $ЗП_1$. После того, как $ЗП_1$ окажется в проводящем состоянии, через него и диод $Д_5$ потечет межбазовый ток однопереходного транзистора. Этим транзистором осуществляется все дальнейшее управление переключением схемы.

Кольцевой счетчик. Кольцевой счетчик можно рассматривать как схему с последовательным переключением напряжения с одной нагрузки на другую, причем нагрузки включены так, что образуется замкнутый контур. Переключение напряжения с одной нагрузки на другую всегда осуществляется в одном и том же направлении и происходит при подаче управляющего импульса на общую шину сдвига. По существу, схема кольцевого счетчика получается в результате дальнейшего развития основной схемы триггера, так как триггер можно рассматривать как двухкаскадный кольцевой счетчик. В приведенной на рис. 47 схеме кольцевого счетчика три $ЗП$ коммутируют цепи трех ламп накаливания.

Когда первоначально подается напряжение питания, ни один из запираемых переключателей не переводится в проводящее состояние. Для того чтобы установить схему в исходное состояние, необходимо замкнуть кнопкой контакт в входной цепи, в результате чего произойдет включение $ЗП_1$ и к нагрузке $Л_1$ будет приложено напряжение источника E. В этот момент диоды $Д_5$ и $Д_6$ будут смещены в обратном направлении напряжением источника питания, в то время как диод $Д_4$ будет смещен напряжением, меньшим 2 *в*, обусловленным падением напряжения на соответствующем запираемом пере-

ключателе. Если к шине сдвига приложить положительный импульс, амплитуда которого больше 4 *в*, но меньше величины напряжения питания, диоды $Д_5$, $Д_6$ будут блокировать появление этого импульса на управляющих электродах $ЗП_1$ и $ЗП_3$. Однако через диод $Д_4$ и конденсатор C_2 этот импульс попадает на управляющий электрод $ЗП_2$, благодаря чему последний переключится в проводящее состояние. Одновременно с процессом включения $ЗП_2$ будет происходить запирание $ЗП_1$. Запирание вызывается переходным процессом в управляющей цепи, в результате которого на управляющий электрод $ЗП_1$ через конденсатор C_5, сопротивление R_6 и диод $Д_1$ поступает отрицательный импульс. Когда на шину сдвига подается следующий управляющий импульс, происходит включение $ЗП_3$ и запирание $ЗП_2$.

Генератор пилообразного напряжения. На рис. 48 приведена схема высоковольтного генератора пилообразного напряжения, рабо-

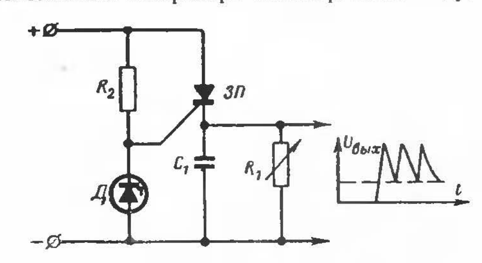


Рис. 48. Генератор пилообразного напряжения.

тающего в автоколебательном режиме. При подаче питания запираемый переключатель $ЗП$ включается, в результате чего напряжение питания прикладывается к конденсатору C_1. Когда напряжение на конденсаторе C_1 возрастает настолько, что начнет превышать величину пробивного напряжения стабилитрона $Д_1$, управляющий электрод $ЗП$ окажется смещенным в обратном направлении. Ток в управляющей цепи $ЗП$ меняет направление, и прибор запирается. После этого происходит разряд конденсатора C_1 через резистор R_1 и подключенное параллельно ему сопротивление внешней нагрузки. Последующее включение $ЗП$ и повторение всего цикла начнется в тот момент, когда напряжение на конденсаторе C_1 уменьшится до величины, меньшей напряжения пробоя стабилитрона $Д_1$, и через управляющий электрод начнет протекать положительный ток.

Стабилизированный преобразователь напряжения. Запираемый переключатель очень удобен для работы с понижающими трансформаторами постоянного тока. Он обладает всеми необходимыми для этого характеристиками, а именно способностью работать от источников питания постоянного тока с повышенным напряжением и переключать ток на относительно высоких частотах. Запираемый переключатель имеет небольшие габариты, механически прочен и отличается надежностью, свойственной кремниевым приборам.

На рис. 49, приведена схема стабилизированного источника питания постоянного тока с входным напряжением 100—200 *в* и выходным 24 *в*. Здесь запираемый переключатель используется в качестве основного переключающего и стабилизирующего элемента. Такой

источник питания обладает превосходными характеристиками и благодаря своему небольшому весу, малым габаритам и высокому к. п. д. может быть использован в качестве источника питания в вычислительных машинах, управляемых снарядах, в авиационном бортовом оборудовании и различных промышленных установках. В этой схеме при изменении входного напряжения постоянного тока от 100 до 200 *в* и (или) при изменении нагрузки от 0 до 100 *ма* выходное напряжение меняется менее, чем на 3%. Коэффициент полезного действия составляет около 50%. Большая часть потерь схемы выделяется на резисторе R_1, который выбирается таким образом, чтобы обеспечить подведение к управляющему электроду *ЗП* тока при минимальном уровне напряжения питания.

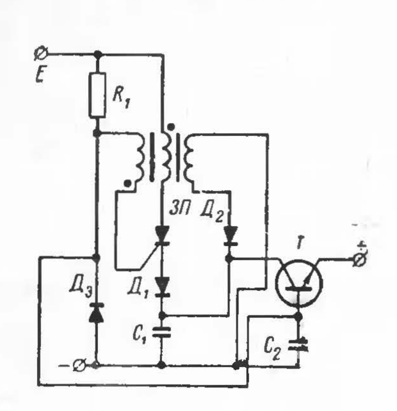


Рис. 49. Стабилизированный источник питания.

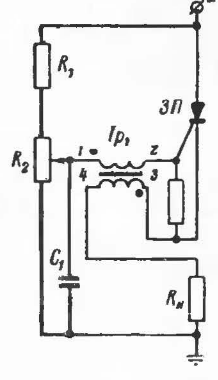


Рис. 50. Схема прерывателя.

На рис. 50 приведена схема прерывателя, отличающаяся простотой и рассчитанная на различные применения. Схема работает следующим образом. При подаче напряжения питания запираемый переключатель *ЗП* остается в выключенном состоянии до тех пор, пока не произойдет насыщение сердечника трансформатора $Тр_1$. При насыщении $Тр_1$ его сопротивление падает, и через резисторы R_1 и R_2 потечет положительный управляющий ток, включающий *ЗП*. Обмотка *3—4* трансформатора обеспечивает положительную обратную связь, ускоряющую процесс включения. После того, как *ЗП* начнет проводить ток нагрузки, полярность напряжения на обмотке *1—2* меняется. Это обусловлено тем, что управляющий электрод и катод запираемого переключателя находятся под положительным напряжением, а трансформатор $Тр_1$ выходит из насыщения.

Запираемый переключатель продолжает находиться в проводящем состоянии до тех пор, пока поток в сердечнике трансформатора $Тр_1$ не окажется насыщенным в обратном направлении. При насыщении отрицательный управляющий ток протекает через резистор R_2 и осуществляет выключение *ЗП*. Отношение длительности интервала, в течение которого *ЗП* находится в проводящем состоянии, к длительности интервала, в течение которого он заперт, задается установкой потенциометра R_2. Другой способ регулировки этого отношения можно осуществить введением третьей обмотки трансформатора $Тр_1$, использование которой позволит регулировать скважность путем изменения тока в этой обмотке.

Генератор импульсов повышенного напряжения. Схема, приведенная на рис. 51, может быть использована в качестве генератора импульсов повышенного напряжения или в качестве повышающего преобразователя постоянного тока Схема работает следующим образом.

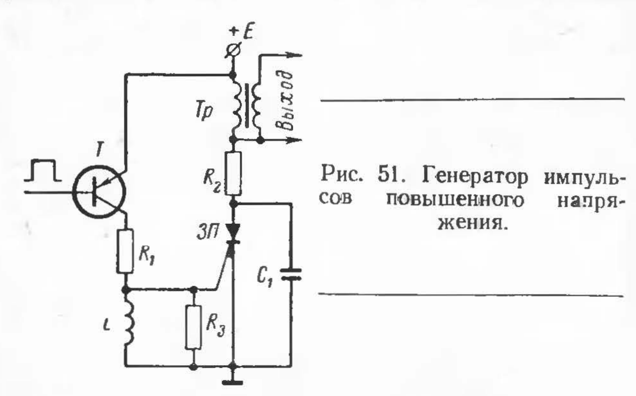


Рис. 51. Генератор импульсов повышенного напряжения.

Когда транзистор *T* отперт, ток проходит через резистор R_1 и включает запираемый переключатель *ЗП*. При этом в первичной обмотке трансформатора *Тр* и в катушке индуктивности *L* начинает возрастать ток. Когда происходит запирание транзистора *T*, ток, ранее протекающий через индуктивность *L*, ответвляется в управляющую цепь *ЗП* и последний выключается. При выключении *ЗП* во вторичной обмотке трансформатора *Тр* индуцируются затухающие колебания повышенного напряжения. Частота колебаний определяется индуктивностью трансформатора и емкостью конденсатора C_1.

Тащиян Виталий Ваграмович

Полупроводниковые переключающие приборы

Редактор *С. А. Гаряинов*
Художественный редактор *Д. И. Чернышев*
Техн. редактор *Л. И. Гаврилина*
Корректор *Р. К. Шилова*

Сдано в набор 21/XI 1966 г. Подписано к печати 16/II 1967 г.
Формат $84\times108^{1}/_{32}$ Бумага типографская № 2
Т-01769 Усл. печ. л. 3,78 Уч.-изд. л. 4,95
Тираж 30 000 экз. Цена 20 коп. Заказ 2730

Издательство „Энергия", Москва, Ж-114, Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР.
Шлюзовая наб., 10.